VIDA INTELIGENTE EN EL UNIVERSO

CARL SAGAN
Cornell University
Smithsonian Astrophysical Observatory

I. S. SHKLOVSKII
Sternberg Astronomical Institute
Soviet Academy of Sciences



EDITORIAL REVERTÉ, S. A.
Barcelona - Bogotá - Buenos Aires - Caracas - México

Titulo de la obra original
Intelligent Life in the Universe

Edición original en lengua inglesa publicada por
Holden-Day, Inc., San Francisco

Versión española por
José Company Bueno
Capitán de la Marina Mercante
Profesor Adjunto de Astronomía Náutica y Navegación
Escuela Superior de la Marina Civil de Barcelona

Propiedad de EDITORIAL REVERTÉ, S. A.
Encarnación, 86-88
(08024) Barcelona

Impreso en España   Printed in Spain

ISBN - 84 - 291 - 4159 - 6

Dep. Legal: B. 35001 - 1984
LITOCLUB, S.A. - Nápoles, 300 - 08025 Barcelona

Prólogo

"La presa persigue al cazador", me decía Josef Shmuelovich Shklovskii en una carta, en 1962. Conociendo la amplia esfera de sus intereses, le había enviado una prueba de un artículo mío titulado "Contacto directo entre las civilizaciones galácticas por vuelo espacial interestelar relativista", que es un ensayo especulativo sobre un tema que creía podría interesarle. Shklovskii me escribió para decirme que estaba terminando un libro semipopular, Vselennaia, Zhizn, Razum (Universo, Vida, Pensamiento). *Lo estaba escribiendo para el quinto aniversario del lanzamiento del primer satélite artificial soviético el 4 de octubre de 1957. Shklovskii estaba pensando en escribir un capítulo sobre la posibilidad de vuelos espaciales interestelares cuando le llegó mi prueba, justo a tiempo para que la incluyera en parte en su texto.* Vselennaia, Zhizn, Razum *se publicó en Moscú a principios de 1963. Partes de la obra se publicaron en forma de serie en* Komsomolskaya Pravda, *y en forma extractada en la revista científica soviética* Priroda. *Recibió la aclamación entusiasta en la Unión Soviética y en todas partes y se ha traducido a distintos idiomas, incluido el chino.*

Cuando recibí un ejemplar del libro, me sorprendió por la amplitud de su alcance y por su aspecto de novela. Le escribí a Shklovskii preguntándole si podría traducirlo al inglés, a lo cual accedió en seguida, ofreciéndome material adicional para que lo añadiera si lo creía conveniente. A medida que avanzaba la traducción en las manos de la competente Paula Fern, no pude resistir la tentación de hacer anotaciones al texto, esclarecer conceptos para el no científico, comentar extensamente e introducir nuevo material. El retraso en la publicación de la edición en inglés es atribuible por completo a estas razones. He añadido casi tanto material como el que había en la obra original y las figuras y títulos son de mi propia responsabilidad. Confío, que como resultado, el libro sea algo más atrayente. Shklovskii también ha hecho muchos cambios y adiciones, que se han incorporado a la edición inglesa.

El resultado es una clase peculiar de empeño de cooperación. Casi todo lo añadido se lo envié a Shklovskii para que lo enjuiciara y él, a su vez, me envió mucho nuevo para que lo incluyera. Dado que él no sale de la Unión Soviética y que yo no fui nunca allí, no pudimos comentar verbalmente esta edición. "La probabilidad de nuestro encuentro es inverosímil que sea menor que la de la visita a la Tierra de un cosmonauta extraterrestre" me escribió una vez con humor atrevido. En consecuencia, hay partes en esta obra en las que Shklovskii y yo alternamos frases e incluso, a veces, insertamos notas en los párrafos del otro. Shklovskii y yo estamos de acuerdo en casi todos los principios esenciales del libro, pero para evitar la posible atribución a Shklovskii de las consideraciones que él no sustenta, he adoptado la siguiente estratagema: las frases y párrafos que aparecen en la edición rusa del libro y las adiciones aportadas por Shklovskii se presentan en tipo normal. Las anotaciones, adiciones y comentarios de mi parte, van encerradas por los símbolos ≪ y ≫, el primero precediendo a mi contribución y el segundo siguiéndola. En aquellos casos en que Shklovskii emplea el pronombre "nosotros", como en "creemos" o "pensamos", supone generalmente una opción que ambos compartimos.

Tal como el lector puede esperar de un libro escrito por dos autores, uno en la Unión Soviética y el otro en los Estados Unidos, existen ocasionalmente diferencias ideológicas. No he procurado evitar esos problemas, ni tampoco contradecir, en lo que fundamentalmente es una obra científica, cada afirmación ideológica. Cuando Shklovskii expresa su creencia de que la paz mundial duradera es imposible mientras subsista el capitalismo o da a entender que los lasers se están desarrollando activamente en los Estados Unidos únicamente por sus posibles aplicaciones bélicas, he dejado las frases intactas, a pesar de su intención política. De vez en cuando he interpuesto algunas observaciones a temas afines, que quizá no aprueba Shklovskii. No creo que el lector se vea confundido por el aspecto ocasional de un diálogo.

La posibilidad de vida extraterrestre ha causado en la Unión Soviética cierta perplejidad. Hubo en otro tiempo en Alma Ata, en la República Socialista Soviética de Kazakh, un Instituto de Astrobotánica, algunos de cuyos miembros argüían que la existencia de vida extraterrestre venía impuesta por el materialismo dialéctico e implicaba fuertemente que la ausencia de vida en Marte e incluso en Júpiter, sería una clara desaprobación de la base filosófica del Comunismo. Esta situación peligrosa dio motivo a un artículo publicado en el ejemplar de septiembre-octubre de 1958 de la revista astronómica soviética Astronomicheskii Zhurnal, titulado "Respecto al fundamento filosófico de una cuestión", de I. G. Perel, en el que pone de manifiesto que tanto la escuela filosófica materialista como la idealista parecen mantener firmemente la probabilidad de vida extraterrestre. Razona que el materialismo dialéctico es un método, no un cuerpo de conocimiento, a pesar de que Shklovskii lo mantenga en la página 148 del libro y, en particular, que ni siquiera si Marte o Júpiter carecen de vida, desaprueban el materialismo dialéctico. Esta polémica ha tenido su réplica con otros comentarios en los Estados Unidos, que si bien sobre bases ideológicas distintas, resultan ser de contenido muy similar.

La presente obra tiene diez capítulos más que la original rusa, debido casi por completo a asuntos nuevos. La disposición general permanece como en la edición rusa: una presentación primero de formación astronómica, luego de la naturaleza de la vida y de su posible ocurrencia en nuestro sistema solar y, finalmente, un tratamiento de la posibilidad de que existan en los planetas de otras estrellas civilizaciones técnicas comunicativas adelantadas. En el capítulo introductorio de Shklovskii aparece una visión general del libro más detallada. Yo he añadido un capítulo introductorio sobre los peligros psicológicos del estudio de la vida extraterrestre.

Me resulta imposible dar las gracias a todos y cada uno de aquellos que me han ayudado a dar forma a mis puntos de vista sobre los temas de este libro. No obstante, quisiera agradecer mi reconocimiento a las siguientes personas por sus comentarios determinados a asuntos apropiados o por la lectura y comentarios a diversas partes del manuscrito de esta obra: Dr. Elso Barghoorn, Dr. Geoffrey Burbidge, Dr. Frank Drake, Dr. Freeman Dyson, Dr. Owen Gingerich, Dr. J. B. S. Haldane, Dr. David Layzer, Dr. William Irvine, Dr. Luigi Jacchia, Dr. G. P. Kuiper, Dr. A. E. Lilley, Dr. Philip Morrison, Dr. H. J. Muller, Dr. James B. Pollack, Dr. Lynn Sagan, Dr. Evry Schatzmann, Dr. Ellie Shneour, Dr. Charles H. Townes y Dr. Andrew T. Young. Estoy también agradecido al Dr. Leo Goldberg por su consejo editorial. Ninguno de los precedentes es, como es natural, causante de ningún error de hecho o de interpretación que pueda haberse deslizado en el manuscrito.

Además de las citas que se hacen a lo largo del texto, se hacen también los siguientes agradecimientos: La composición fotográfica de la cubierta es por cortesía de la NASA y de los observatorios de Monte Palomar y Monte Wilson. La caricatura del frontis, de POGO es © de Walt Kelly y se reimprime por amable cortesía del Hall Syndicate, Inc. Cartoons; la página 24 de Charles Schulz, © de United Features Syndicate y publicada también en It's A Dog's Life, Charlie Brown, de Holt, Rinehart y Winston. Las citas de las páginas 25, 198, 398 y 482, del The Immense Journey (1946), de Loren Eiseley, © de Random House, Inc. están reproducidas con autorización. Los observatorios de Monte Wilson y Monte Palomar, por cuya cortesía se reproducen las fotografías de la página 7 y de muchas otras partes de la obra, están asociados a la Carnegie Institution de Washington y al California Institute of Technologie. El observatorio de Yerkes, por cuya cortesía se reproducen las ilustraciones de la página 42 y de otras partes, forma parte de la Universidad de Chicago. El diagrama de la página 86 se reproduce por cortesía del catedrático Chushiro Hayashi. Los diagramas del Astrophysical Journal, de las páginas 87 y 90 están registrados © por la Universidad de Chicago en los años indicados. El diagrama de la página 93 apareció también en el volumen "Stellar Populations", Specola Vaticana Richerche Astronomiche, volumen 5, página 227. Las figuras del Astrophysical Journal, de las páginas 128 y 129 están © por la Universidad de Chicago. El diagrama de la página 163



Cúmulo estelar en la región galáctica central. En esta fotografía hay aproximadamente un millón de estrellas. De acuerdo con las estimaciones del capítulo 29, en un planeta de esas estrellas existe una civilización científica mucho más avanzada que la nuestra. (Cortesía de los Observatorios de Monte Wilson y Monte Palomar.)



Existe una casta de hombres;
una casta de dioses; ambas reciben el hálito de vida
de una sola madre. Pero la fuerza separadora
nos mantiene divididos, de modo que una no es nada,
mientras que para la otra se establece
el cielo abierto, su eterna y segura ciudadela.
Con todo, tenemos alguna semejanza en gran inteligencia,
o vigor, a los inmortales, aunque no sabemos qué nos
traerá el día, qué sucederá a la caída de la tarde,
la suerte, el destino ha escrito que debemos
marchar hasta el final.

Píndaro, *Las nemeas*

1

Perspectivas

Innumerables son las maravillas del mundo,
pero ninguna tan maravillosa como el hombre;
el mar proceloso se rinde ante sus tajamares,
las impresionantes crestas lo transportan a las alturas...
El león en la colina, el caballo indómito con sus crines al viento,
se resignan ante él y su yugo brusco ha roto los sofocantes
brazuelos del toro de la montaña.
Palabras además, y pensamientos tan rápidos como el viento
adapta a su conveniencia...

Sófocles, *Antígona*

Pero mi sorpresa llegó al máximo cuando supe que (Sherlock Holmes) desconocía la teoría de Copérnico y la composición del sistema solar. El que alguna criatura humana no supiera en el siglo diecinueve que la Tierra da vueltas alrededor del Sol me parecía un hecho tan extraordinario que me costaba creerlo.

"Parece usted sorprendido" dijo sonriendo ante mi expresión de sorpresa. "Ahora que lo sé, haré los posibles por olvidarlo..."

"¡Pero el sistema solar!", protesté.

"¿Qué diantres me importa?", me interrumpió impacientemente: "Usted dice que giramos alrededor del Sol. Me importaría lo mismo que lo hiciéramos alrededor de la Luna".

Sir Arthur Conan Doyle, *La mancha escarlata.*

Desde los albores de la historia, ha especulado el hombre acerca de la posibilidad de que haya vida racional en otros mundos fuera de la Tierra. Esta idea surgió probablemente de las frecuentes e infructuosas tentativas de las religiones primitivas para dar significado a aquellos aspectos del entorno que no tenían explicación aparente. En la antigua civilización Vedda de Ceilán, la creencia de la migración del alma tras la muerte iba unida al concepto de pluralidad de mundos habitables. Se creía que las almas de los muertos emigraban al Sol, a la Luna y a las estrellas antes de alcanzar el estado de Nirvana.

A medida que se desarrolló la astronomía empezó a tomar base científica el concepto de vida en otros mundos. La mayoría de los primitivos filósofos griegos, materialistas e idealistas, pensaban que nuestra Tierra no era la única morada de vida racional. Considerando las limitaciones de la ciencia en aquella época, estos primeros filósofos mostraron gran ingenio y originalidad. Tales de Mileto, el fundador de la escuela jónica de filosofía, sostenía que las estrellas y la Tierra estaban hechas de la misma materia. Anaximandro, que los mundos se creaban y se destruían. Anaxágoras, uno de los primeros en proponer la teoría heliocéntrica, creía que la Luna estaba deshabitada. Mantenía además, que por todo el universo estaban dispersas invisibles "semillas de vida" de las que se originaban todas las cosas vivientes.

Siglos más tarde, diversos científicos y filósofos propusieron conceptos semejantes de "panspermia" (vida omnipresente), cuya idea se incorporó a la cristiandad poco después de su comienzo.

La escuela epicúrea de filosofía materialista sostenía que existían en el espacio muchos mundos habitables como nuestra Tierra. El epicúreo Metrodoros afirmaba: "Considerar que la Tierra es el único mundo habitado en el espacio infinito es tan absurdo como asegurar que en todo un campo sembrado de mijo sólo germinará un grano". Es de interés que los proponentes de esta doctrina consideraban que no sólo los planetas, sino también otros cuerpos celestes de las vastas dimensiones del espacio estaban habitados.

El filósofo romano Tito Lucrecio Caro fue un ardiente exponente del concepto del pluralismo de los mundos. En su famoso poema *De la naturaleza de las cosas* escribió: "La naturaleza no es única del mundo visible; hemos de tener fe que en otras regiones del espacio existen otras tierras, habitadas por otras personas y otros animales". Resulta curioso en extremo que Lucrecio no comprendía la verdadera naturaleza de las estrellas y que las concebía como vapores terrestres luminosos; por lo tanto, sus mundos habitados tenían que estar localizados en la periferia del universo visible.

Hasta quince siglos después del nacimiento de Jesús de Nazaret, la cosmología cristiana, influida por las teorías de Ptolomeo, se aferró a que la Tie-

rra era el centro del universo. El concepto de vida en otros mundos resultaba ser incompatible con esa filosofía. La anulación de la cosmología basada en el sistema de Ptolomeo comenzó cuando el célebre astrónomo polaco Nicolás Copérnico situó al hombre en su lugar apropiado en el sistema solar, — echando por tierra su condición privilegiada — como un planeta más entre los muchos que giran alrededor del Sol.

⩽ El descubrimiento de Copérnico sentó en su precisa explicación, con modesta investidura de hipótesis, los movimientos de los planetas. La hipótesis de Ptolomeo, de que el Sol, la Luna y los planetas, encerrados en esfera de cristal circundaban la Tierra, fueron encontrando cada vez más dificultades con el paso de los años, para explicar las observaciones de los cambios planetarios y lunares y de los movimientos solares. Una característica típica de la hipótesis de Ptolomeo respecto a un conjunto de movimientos era lo que denominó teoría de los epiciclos. En la época de su invención, la hipótesis heliocéntrica de Copérnico explicaba meramente los movimientos de la forma

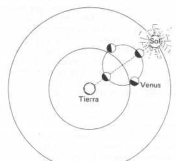


Figura 1-1. Representación esquemática de las posiciones relativas de la Tierra, el Sol y Venus en la cosmología de Ptolomeo. Para explicar los movimientos de Venus había que imaginar al planeta girando alrededor de un punto de la recta entre la Tierra y el Sol. Obsérvese que el centro del hemisferio iluminado (1) de Venus (hacia el Sol) no se podía observar nunca desde la Tierra.

más simple; más tarde, cuando Galileo descubrió que el planeta Venus presentaba fases como las de la Luna, fue cuando se demostró era correcta, en sus puntos principales, la hipótesis de Copérnico y cuando se vinieron abajo

1.- N. del T. - Polo de iluminación.

los puntos de vista de Ptolomeo. Por si hiciera falta alguna refutación moderna a la cosmología ptolomeica, ahí están los vehículos espaciales. Los vuelos del Luna III, del Mariner II y del Mariner IV, etc., no fueron acompañados del tintineo de la rotura de los cristales de las esferas.

⩽ La distinción entre ambas cosmologías, la de Ptolomeo y la de Copernico, es un ejemplo interesante de construcción de modelo o hipótesis en ciencia: las dos explicaban los movimientos de los planetas. El punto de vista heliocéntrico de Copérnico era una hipótesis más sencilla, pero esto, por sí solo, no demuestra su validez, pues, después de todo, la Naturaleza puede ser compleja. Sin embargo, si ambas suposiciones dan cuenta igualmente bien del movimiento planetario, no se nos puede en verdad criticar si pensamos según el modelo más sencillo. No obstante, las presentaciones de Ptolomeo y de Copérnico difieren en otro aspecto. De acuerdo con el primero, el Sol da vueltas alrededor de la Tierra y dentro de la esfera del Sol se encuentran la de Venus y la de Mercurio. Con una disposición física así, nos resultaría imposible ver ni tan siquiera la cara iluminada de Venus (véase la figura 1-1). En cambio, según Copérnico, tanto la Tierra como Venus han de girar alrededor del Sol y como no siempre estará Venus en conjunción (figura 1-2) se podrá ver su parte iluminada. Así, cuando Galileo apuntó su telescopio hacia Venus y vio que su disco sufría fases desde un "Venus lleno" correspondiente a luna llena, a un "Venus nuevo" (el lado oscuro, no iluminado, de Venus) corres-

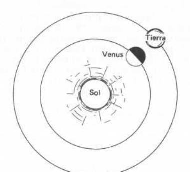


Figura 1-2. Representación esquemática de las posiciones relativas de la Tierra, el Sol y Venus en la cosmología de Copérnico. Obsérvese que el centro del hemisferio iluminado de Venus (hacia el Sol) puede observarse a veces desde la Tierra.

pondiente a "luna nueva", quedó clara la vindicación de la hipótesis de Copérnico. No significa esto que el punto de vista de Copérnico sea completamente válido en todos sus aspectos; es simplemente un modelo que se amolda, dentro de nuestro grado de precisión, a todas las observaciones.

≪ Años más tarde, Johannes Kepler demostró que las órbitas de los planetas alrededor del Sol no eran circunferencias, sino elipses. La predicción sobre los movimientos planetarios observados, basada en una ley de mutua atracción gravitatoria y comprobados para la Luna, fue la coronación de los éxitos de Isaac Newton, logrando llegar a explicar con todo detalle los movimientos del Sol, de la Luna y de los planetas, basándose en hechos simples y harto comprobados. ≫

Las primeras observaciones telescópicas de Galileo abrieron una nueva era en astronomía y asestaron un duro golpe a las ideas de muchos de sus contemporáneos. Se hizo patente que los planetas eran semejantes a la Tierra en muchos aspectos. Galileo escribió en su *Sidereus Nuncius:*

> He llegado a la opinión y convicción de que la superficie de la Luna no es lisa, ni uniforme, ni del todo esférica como creen que es (igual que muchos otros cuerpos celestes) gran número de filósofos, sino que es irregular, rugosa, llena de cavidades y promontorios, no estando, a diferencia de la Tierra, caracterizada por cordilleras ni profundos valles.

Esto evocó las siguientes preguntas: Si en la Luna hubiera montañas y valles ¿No podría haber también ciudades habitadas por seres racionales como aquí? y ¿Es el Sol el único astro acompañado de planetas?

Estas ideas audaces fueron ya anteriormente propuestas por el filósofo italiano Giordano Bruno, que escribió: "Existen innumerables soles, alrededor de los cuales dan vueltas innumerables tierras de igual forma que los siete planetas giran alrededor de nuestro Sol. Esos mundos están habitados por seres vivos". El clero católico romano de su época lo denunció por sus ideas radicales y Bruno fue juzgado por un tribunal de la Inquisición y quemado en la hoguera en Roma, el 17 de febrero de 1600. Hasta finales del siglo XVII la Iglesia se opuso violentamente a la nueva teoría heliocéntrica, pero, con el tiempo, adaptó su filosofía a los nuevos conceptos científicos. Son muchos los teólogos actuales que aceptan la premisa de que puede haber seres racionales en otros planetas, sin que ello contradiga los dogmas fundamentales de sus religiones.

Durante la segunda mitad del siglo XVII y principios del XVIII, hubo muchos científicos, filósofos y escritores (principalmente Cyrano de Bergerac, Christiaan Huygens, Bernard de Fontenelle y Voltaire) que publicaron obras que trataban de la vida en otros planetas. Algunas de ellas eran persuasivas; las de Voltaire, sobre todo, tenían pensamientos profundos, si bien eran puramente especulativas. Científicos y filósofos famosos, tales como Kant, Laplace, Herschel y Lomonosov, eran adictos a la hipótesis de la pluralidad de los mundos habitados y a fines del siglo XVIII, esta hipótesis la compar-

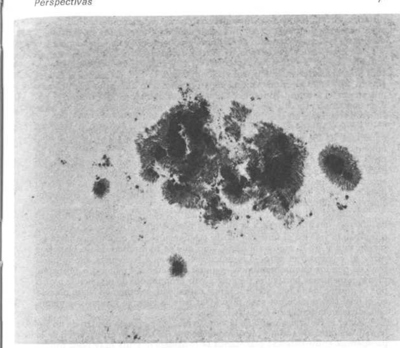


Figura 1-3. Fotografía telescópica de una compleja mancha solar. Sobre el grano fino - como granos de arroz - del disco visible del Sol, aparecen esas manchas oscuras. Están mucho más frías que sus alrededores y son lugares de intensos campos magnéticos. Algunos astrónomos primitivos creyeron que las manchas solares eran las ventanas de una región más fría, habitable, debajo de la fogosa capa externa. (Cortesía de los Observatorios de Monte Wilson y Monte Palomar.)

tían casi universalmente todos los científicos e intelectuales. Sin embargo, algunos eran recelosos acerca de la idea de que existiera vida en *todos* los planetas. William Whewell, filósofo inglés, afirmaba en un libro aparecido en 1853, que quizá no todos los planetas fueran morada adecuada para la vida. Presumía que los planetas mayores del sistema solar estaban compuestos de "agua, gases y vapor" que los inhabilitaban para la vida. "En proporción a su

distancia al Sol, los planetas interiores habían de tener grandes cantidades de agua caliente en su superficie". Whewell mantenía también la no existencia de vida en la Luna y su punto de vista fue gradualmente ganando adeptos.

La creencia en la existencia de vida extraterrestre continuó aumentando durante el siglo XVIII y principios del XIX. William Herschel, eminente astrónomo inglés, creía que el Sol estaba habitado y que las manchas solares (figura 1-3) eran aberturas en una capa brillante a su alrededor que nos permitían ver el interior. Hipotéticos seres solares habitaban ese interior y podían contemplar las estrellas a través de las aberturas del tejado. Incluso Isaac Newton creyó que en el Sol había seres vivientes.

En la segunda mitad del siglo XIX, la obra de Camille Flammarión, *La pluralidad de los mundos habitados*, alcanzó gran popularidad en Francia y muchos otros paises (por las traducciones que se hicieron). En ésta, como en otras obras, Flammarión sostenía que los planetas fueron del todo creados para el desarrollo de la vida. En un período de 20 años escribió unas 30 obras en un estilo figurado, que causaron honda impresión en sus coetáneos. Flammarión buscaba más –y lo lograba– la emotividad del lector que la lógica; incluso hoy resulta evocativo leer sus obras.

A finales del siglo XIX y principios del XX recibieron amplia propaganda diversas modificaciones a la hipótesis panspérmica. De acuerdo con esta hipótesis, la vida en el universo existe eternamente; los organismos vivos no surgen nunca de la materia muerta, sino que se transmiten de un planeta a otro. Al comenzar el siglo, el químico sueco Svante Arrhenius, dio la hipótesis de que los microorganismos - esporas o bacterias - adheridos probablemente a pequeñas partículas de polvo, son propulsados de un planeta a otro por la presión de la luz estelar. Si, por casualidad, se posan en algún planeta en el cual las condiciones sean favorables para la vida, se supone que germinan e inician la evolución local de la vida.

Aunque esa transmisión de la vida de planeta a planeta dentro de un sistema planetario aislado no puede desestimarse del todo, la propagación de la panspermia entre sistemas planetarios se considera hoy día muy poco probable. (Véase el capítulo 15.) La hipótesis de que la vida es eterna parece no ir de acuerdo con la evidencia actual de la evolución de las estrellas y galaxias, la cual, basada en numerosas observaciones, implica que hubo un tiempo en el que la Via Láctea consistía únicamente en hidrógeno o hidrógeno y helio y que sólo cuando evolucionó fue cuando se formaron los elementos más pesados necesarios para el origen de la vida. (Véase el capítulo 8.) Finalmente, algunos cálculos espectrales del "corrimiento hacia el rojo" de la luz de galaxias remotas, indican aparentemente que hace unos 10 a 20 mil millones de años las condiciones del universo eran tales que hacían muy poco probable la existencia de vida. (Véase el capítulo 10.) Esas observaciones parecen implicar que la vida se origina *desde el principio* en regiones aparte del universo en aquellas fases de la evolución de la materia en que resultan favorables las condiciones. Parece pues que la hipótesis de la panspermia es insostenible como concepto fundamental.

Konstantin E. Tsiolkooskii, el fundador ruso de la astronáutica, era un creyente ardiente de la pluralidad de los mundos. Escribió:

> ¿Es posible que Europa esté habitada y que otras partes del mundo no lo estén? ¿Es posible que una isla esté habitada y otras no lo estén?. . . Las fases del desarrollo de la vida se pueden hallar en distintos planetas. . . ¿Existía el hombre hace miles de años y se extinguirá dentro de varios millones?. . . Todo este proceso puede hallarse en otros planetas. . .

Si bien la primera cita parece como el reflejo de la visión de los filósofos antiguos, la segunda es una idea nueva e importante. Los escritores anteriores habían descrito las civilizaciones en otros planetas como de seres semejantes, social y tecnológicamente, a los de la Tierra. Tsiolkooskii, en cambio, opina que podrían existir civilizaciones extraterrestres a diferentes niveles de desarrollo. Debemos observar, sin embargo, que ese punto de vista no se podía (ni se puede ahora) confirmar por la evidencia directa.

La evolución de la hipótesis de la pluralidad de los mundos se ha unido con frecuencia a las cosmogónicas –hipótesis referentes a la creación u origen del universo. La del astrónomo inglés Sir James Jeans, que prevaleció durante el primer tercio de nuestro siglo, suponía que el sistema planetario solar nuestro se formó a consecuencia de un extraño cataclismo cósmico (quizá el choque oblicuo de dos estrellas). La vida en el universo fue un fenómeno raro; en nuestra galaxia (consistente en unos 150 mil millones de estrellas), se consideraba muy poco probable que otra estrella tuviera un sistema planetario que se pareciera al nuestro. El fracaso de la hipótesis de Jeans para explicar las masas, movimientos y composición de los planetas y el rápido desarrollo de la astrofísica, han llevado a las conclusiones actuales de que dentro de nuestra Galaxia hay un vasto número de sistemas planetarios; nuestro sistema solar es la regla, no la excepción, en un universo de estrellas. No obstante, tampoco esta teoría está todavía demostrada de forma concluyente. (Véanse los capítulos 11 - 13.)

Los conceptos respecto a la cosmogonia estelar y planetaria han influido considerablemente en el estudio del origen de la vida. Ahora se puede determinar la edad de una estrella y el intervalo durante el cual su luminosidad es regularmente constante (condición necesaria para que haya vida en alguno de los planetas que la acompañen). La cosmogonía estelar nos permite también predecir el futuro de nuestro Sol y, de ello, el destino o muerte de la vida en la Tierra. Los últimos descubrimientos en el campo de la astrofísica permiten un nuevo enfoque científico al problema de la pluralidad de los mundos habitables.

Hoy en día se está enfocando la cuestión de forma totalmente distinta: por medio de la biología molecular. Resulta ahora evidente explicar en gran parte, el origen de la vida, por estudios realizados en el campo de la química. Estamos empezando a comprender por qué medios y bajo qué circunstancias ambientales pueden originarse las reacciones orgánicas complejas determina-

das que llevan al origen de la vida. En los últimos años los químicos han dado grandes pasos en esa cuestión. Los avances sobresalientes en genética y la aclaración de la importancia del ácido desoxirribonucleico (DNA) y del ribonucleico (RNA) han permitido una nueva comprensión de la base de la vida y de sus comienzos. Ahora, por primera vez, se han sometido a experimento de laboratorio los problemas del origen de la vida.

Con el lanzamiento y puesta en órbita del primer satélite artificial de la Tierra efectuado por la Unión Soviética el 4 de octubre de 1957, entró en una fase nueva el concepto sobre la pluralidad de los mundos habitables. Los vuelos orbitales triunfales de los cosmonautas soviéticos Y. A. Gagarín, G. Titov, A. G. Nikolaev, V. F. Byokovsky, P. R. Popovich y V. Tereshkova y los de los americanos John Glenn, M. Scott Carpenter, L. Gordon Cooper, Walter Schirra y de sus sucesores, fueron en un sentido la culminación y, en otro, tan sólo el principio, de una serie de magníficos éxitos en tecnología espacial. Hoy, muchas personas, tanto instruidas como profanas, se dan cuenta, de repente, de que habitan un pequeño planeta envuelto por un espacio infinito. Ahora se enseña Astronomía en las escuelas y los estudiantes tienen una vaga idea de las posiciones relativas de la Tierra y los demás cuerpos celestes. Algunos pueden aún llegar a cierta clase de geocentrismo práctico pero la revolución de nuestros conocimientos sobre lo que nos rodea no hay que desestimarla. Es una revolución que marca el principio de una nueva era en la historia de la humanidad; era de investigación directa y de conquista del cosmos.

La cuestión de la vida en otros planetas ha dejado de ser algo abstracto y ha adquirido significado práctico. Se están ideando métodos experimentales para la investigación directa de nuestro sistema solar. Se lanzan al espacio dispositivos especiales para tratar de detectar vida extraterrestre en las tierras de otros planetas y quizá nos den la respuesta definitiva a esta incógnita secular. Se posarán astronautas en Marte y quizá incluso en nuestro misterioso e inhospitalario vecino, Venus. Por último, podrá el hombre buscar y estudiar la vida extraterrestre por los métodos biológicos convencionales.

Existe un enorme interés público en la posibilidad de vida extraterrestre. El fin principal de este libro es dar a conocer al lector interesado en la vida en el universo, nuestro saber *actual*. Se recalca la palabra actual, porque se están haciendo grandes progresos en el estudio de este problema. Otras obras dedicadas a este tema tratan principalmente la cuestión de la vida en otros planetas de nuestro sistema solar. Esta, sin embargo, incluye además un estudio de dicho sistema, la exposición de la posibilidad de vida en otros sistemas planetarios y los problemas de establecer contacto con civilizaciones separadas de nosotros por distancias interestelares.

El libro se divide en tres partes: la parte I contiene la información astronómica necesaria para la comprensión de las teorías contemporáneas sobre la evolución de las galaxias, las estrellas y los sistemas planetarios; la parte II trata de las condiciones necesarias para que aparezca la vida en un planeta, investigando la cuestión de si dichas condiciones se dan en Marte, Venus y demás planetas del sistema solar y de qué evidencia directa existe sobre la vida fuera de la Tierra. También se valoran concienzudamente las variantes modernas de la hipótesis de la panspermia. La parte III contiene un análisis de la posibilidad de vida racional en otros lugares del universo. Se presta atención especial al problema de establecer contacto con las civilizaciones que pueden existir en planetas de estrellas distantes.

Las dos primeras partes están dedicadas principalmente a resultados concretos; la tercera atañe esencialmente a temas especulativos. Todavía no hemos establecido contacto con civilizaciones interestelares y ni siquiera sabemos si las hay, pero esto no quiere decir, sin embargo, que sean científicamente superfluas las investigaciones de seres extraterrestres o que deban dejarse al campo de la fantasía y la ciencia ficción. Hemos procurado analizar rigurosamente los últimos logros de la ciencia y la tecnología que pueden darnos, en el futuro, una respuesta al problema. La última sección ilustra también la fuerza del intelecto humano en su estado actual de desarrollo. El hombre, por su actividad propia, ha dado ya un significado real al cosmos y en ciertos aspectos lo ha modificado. ¿Qué es lo que no podemos esperar en los siglos venideros?

2

Vida extraterrestre como prueba psicológica destacable

"Los etíopes hacen a sus dioses negros y chatos; los de Tracia hacen a los suyos ojizarcos y pelirrojos. . . . Y si los bueyes y los caballos o los leones tuvieran manos y supieran pintar y hacer obras de arte como los hombres, los caballos pintarían a los dioses como caballos, los bueyes como bueyes y harían sus cuerpos a imagen de sus distintas clases".

Jenófanes

"Si Dios no existiera, el hombre tendría que inventarlo".

Voltaire

"¿. . . eres tan necio como para creer que simplemente porque estamos solos aquí, no hay nadie más en la habitación? ¿Consideras que somos tan aburridos o tan repulsivos, que de todos los millones de seres, imaginarios o distintos, que merodean por el espacio buscando un poco de compañía, no hay ninguno que pueda quizá pasar un rato agradable con nosotros? Al contrario, cariño, mi casa está llena de invitados. . . "

Jean Giraudoux, *La loca de Chaillot*

≮ La posibilidad de vida fuera de la Tierra evoca hoy emociones grandes y partisanas. Algunos necesitan muchísimo para creer que la vida extraterrestre, particularmente la variedad racional, sea común a todo el universo y hay otros que mantienen la imposibilidad de la vida extraterrestre y otros tan raros que no tienen ni interés práctico ni filosófico. Me parece oportuno que en este libro se preste algo más que una atención pasajera a dichas predisposiciones psicológicas.

En la primavera de hace unos años, el departamento de Astronomía recibió una llamada telefónica de la oficina del fiscal del distrito. Se estaba celebrando la prueba criminal contra un caballero al que llamaré Helmut Winckler, de Nebraska, que afirmaba haber tenido contactos personales con habitantes del planeta Saturno. El estado deseaba un testigo experto. Con comentarios tergiversados y apartes profesionales se me pasó el mensaje. Estuve conforme en servir como testigo sorpresa para el procesamiento y se me dio a conocer una colección de publicaciones escritas por el acusado o acerca del mismo.

Lo que sigue es la recopilación de las afirmaciones hechas en aquellas publicaciones, confirmadas luego, bajo juramento, por el acusado:

Winckler era vendedor de herramientas agrícolas en Nebraska; de ascendencia alemana, pero nacido en los Estados Unidos. Era poco ilustrado, pero tenía al menos el grado elemental. Algo regordete, de complexión aplopléticа, robusto y usaba gafas con montura de acero. Parecía mucho más joven que sus sesenta y tantos años, hablaba con voz suave y respetuosamente en el estrado de los testigos. Su acento era el del campesino del medio oeste de los EE. UU.

Winckler testificó que un día, mientras iba de excursión en coche por una carretera dorsal de Nebraska, tuvo la extraordinaria buena fortuna de tropezarse con un platillo volante. Naturalmente, se paró, como cualquiera hubiera hecho. Con sorpresa vio salir del platillo varios hombres y mujeres de aspecto enteramente humano, vestidos con ropas sueltas y que hablaban melifluamente. Por coincidencia, Winckler entendía alto alemán. Los del platillo estaban encantados y Winckler también.

Le explicaron que eran del planeta Saturno y que por razones particulares, habían escogido a Winckler como "intermediario". Venían a darle información muy interesante para los habitantes del planeta Tierra. Parece que la situación política internacional en la Tierra había llegado a tales proporciones, hecho que interesaba a los saturnianos, raza antigua, inteligente y simpática. Habían venido para que nos salváramos, Winckler nunca reveló

por qué le habían seleccionado, aunque no parece que fuese porque sabía alemán, pues los saturnianos hablan todas las lenguas humanas.

Winckler entró con ellos en el platillo. Sus publicaciones contienen esquemas del interior de los platillos, repletas de descripciones esotéricas e incomprensibles de su sistema de propulsión. Los interiores se parecen a los del Buick de 1958.

El grupo partió luego hacia el círculo polar ártico llevándose a Winckler consigo.

En una irrupción que hizo el platillo de los saturnianos con Winckler, le llevaron por debajo del estrecho de Bering para inspeccionar los emplazamientos de los misiles suboceánicos de la Unión Soviética. Ustedes quizá no hayan oído hablar de ellos, pero el gobierno de los Estados Unidos está al corriente de todos ellos, según Winckler.

En otro de los vuelos de Winckler, esta vez sobre el polo Norte, los saturnianos le dijeron que unos meses antes comprobaron que el eje de la Tierra había tomado una inclinación peligrosa de seis grados. Winckler palideció, pero los saturnianos le aseguraron que habían reparado la desalineación en seguida.

Cuando se retiró el tribunal, le pregunté a Winckler acerca del descuidado comportamiento del eje de rotación de la Tierra. Le dije que incluso una mutación mucho más pequeña hubiera sido descubierta inmediatamente por los astrónomos, que cada noche dirigen sus telescopios basándose en que conocen precisamente la posición de los polos celestes. La respuesta de Winckler fue que difícilmente podría considerársele responsable de las afirmaciones hechas por los habitantes del planeta Saturno; que él simplemente estaba difundiendo la información. Pero dejó la clara impresión de que los saturnianos conocían bastante más acerca del tema que los mirones de la sala.

En otra expedición, los saturnianos llevaron a Winckler a esa Meca de lo oculto, a la gran pirámide de Gizeh, en Egipto. Se mezclaron con un grupo de turistas y fueron guiados por el interior de la pirámide. (Tengo una imagen mental viva de esta procesión: el guía egipcio, dos señoras de mediana edad, de Dubuque (Iowa, EE. UU.), unos cuantos turistas franceses y alemanes, seis saturnianos con ropas flotantes y, cubriendo la retaguardia, Helmut Winckler con pantalones vaqueros.) En cierto cruce de los pasillos, los turistas fueron en una dirección y Winckler y los saturnianos en otra. Estaban frente a una pared blanca, pero con presiones precisas sobre ladrillos determinados, se corrió la pared revelando una cámara en el interior. Penetró la pandilla y la puerta de piedra se cerró silenciosamente tras ellos. En la habitación había (1) un platillo volante pequeño, de una plaza, bastante lleno del polvo de los años; (2) una cruz de madera grande e igual de vieja, quizá de tres metros de altura y (3) una corona de espinas de unos veinte centímetros de diámetro. Los saturnianos, como la cosa más natural, le explicaron que uno de ellos había intentado una misión en la Tierra hacía unos dos mil años y que había logrado algunos éxitos meritorios.

Al resumir estos prodigios de Winckler, el ayudante del fiscal del distrito, primero sintió sorpresa, luego incredulidad y, finalmente, justa indignación. Movió la cabeza y la alzó esperando el rayo que, sin duda, terminara con el proceso. La sala estaba en silencio, el jurado pavoroso y Winckler indiferente. Por el tono de su voz, podría haber estado describiendo la venta de una máquina de segar en Lincoln.

Uno de los pasatiempos principales de los saturnianos mientras rondaban la Tierra era el reconocimiento geológico de su antigüedad. Poseían instrumentos capaces de determinar, desde considerable altura, la localización y distribución de minerales. Descubrieron venas intactas de oro, rocas con platino prístino y minerales de uranio desconocidos por el hombre. Las posiciones de esos hallazgos no se las decían a Winckler, pero un día, sin embargo, le indicaron la existencia de una mina de cuarzo mientras volaban por el sur de California. Quizá crean que el cuarzo no tiene nada de interesante comparado con el oro, el platino o el uranio, pero era un cuarzo de clase especial, que curaba el cáncer.

Poco después de aterrizar, Winckler estaba vendiendo acciones del cuarzo. Tengo la clara impresión de que vendió la mitad de las acciones. . . varias docenas de veces. A su posterior situación delicada hay que agregar el hecho de que la mina ya tenía otro propietario y que estaba explotándola activamente. Sucedía también que, por una notable coincidencia, Winckler había estado en esa misma mina unos cuantos años antes.

Pero ninguno de estos actos precipitó directamente la acusación de Winckler. Sus dificultades se pueden seguir por su promoción de las propiedades curativas del cuarzo entre viudas y ancianas adineradas. Muchas señoras le prestaron sumas apreciables para continuar la aventura. En los últimos meses antes de su arresto, tenía la costumbre de hablar ante grandes reuniones de entusiastas de los platillos volantes, algunos de los cuales, aunque de ningún modo todos, eran también viudas ricas y seniles. Pagaban su transporte y manutención, le invitaban a sus casas y le tributaban el respeto habitual debido a los profetas de las religiones nuevas. La demanda que condujo al arresto de Winckler surgió de la combinación de dinero prestado y no restituido y de la promesa de afecto no cumplida.

Para dar una idea de como fue el proceso, he aquí más o menos el diálogo que precedió a mi aparición en el estrado. Después de comprobar que Winckler estaba casado y desde hacia tiempo, en Nebraska, el ayudante del fiscal del distrito siguió la siguiente línea de interrogatorio.

Fiscal: — Ahora, señor Winckler, ha dicho usted varias veces a este tribunal, que no era su costumbre emplear palabras o posturas de afecto en sus tratos con la Sra. Brewster.—

Winckler: — Pues, sí, excepto que le dijera "amor" o "cariño", como hago con mi trabajo.—

Fiscal: — ¿Y no expresó usted nunca a la Sra. Brewster ningún sentimiento profundo de amor o afecto?.—

Winckler: — Sí, eso, sí.—

Fiscal (con las manos entrelazadas en la espalda, los ojos fijos en algún

punto del techo y andando bien despacio): — Y ahora, Sr. Winckler, ¿dio a entender alguna vez a la Sra. Brewster sentimientos tales como estos . . . ? —

Al llegar a este punto, recitó de memoria como unos veinte versos trímetro dactílicos en pareados rimados, que expresaban sentimientos muy trágicos.

Winckler: — En mi vida he dicho algo así.—

Fiscal: — Señoría, quisiera poner en evidencia el documento de prueba número 14.—

Entregó un papel al juez; éste lo leyó y lo pasó al actuario, que tomó unas notas en un libro grande y se lo devolvió al fiscal.

Fiscal: — Ahora, Sr. Winckler ¿quiere examinar con atención la firma al pie de esta postal?—

Winckler (limpiándose las gafas y fijándose en el papel): — Se *parece* a mi firma.—

Fiscal: — Sr. Winckler, ¿recuerda ahora haber enviado esta postal de felicitación a la Sra. Brewster?—

Winckler: — Sí, creo que sí. Pero vea, fue así. Hace unos años llegó a mi casa un tío que era mutilado de guerra y que iba vendiendo postales de felicitación. Me vendió unas 200, de todas clases; las tenía en una caja grande y cuando fue su cumpleaños saqué una y se la envié, pero ni la leí.—

Fiscal: — Es curioso que no pillara por error una de pésame.—

La tarde de ese mismo día fui llamado al estrado de los testigos. Se me había dicho que, como testigo singular para dar testimonio sobre un campo especializado, no se me sometería a un interrogatorio muy severo, pero en este aspecto se equivocó el fiscal. Me preguntó por mi nombre y afiliación y comprobó mis títulos académicos. A continuación me invitó a considerar la probabilidad de seres humanos que habitaran el planeta Saturno.

Describí en qué consiste la espectroscopla y expliqué cómo proporciona información sobre la composición química de los objetos distantes. La espectroscopla astronómica de Saturno, indiqué, demuestra que su atmósfera carece de oxígeno, que contiene grandes cantidades de metano y amoníaco y que ambos compuestos son venenosos para los seres humanos.

A continuación reseñé la forma cómo se mide la temperatura de los planetas con un termopar en el foco de un telescopio grande. La temperatura de las partes de Saturno observables con nuestros telescopios están varios cientos de grados bajo cero. Por último, describí cómo podría determinarse la gravedad en la superficie de un planeta a partir de su masa y radio y mencioné que, dado que la gravedad en la superficie de Saturno era como un 17% superior que en la Tierra, cualquier ser que se desarrollara allí sería probablemente más rechoncho que nosotros.

Resumí mi testimonio diciendo que si bien estas observaciones de ningún modo excluían la posibilidad de cierta clase de vida en Saturno, demostraban de modo bastante convincente la evidencia de que allí no había seres humanos. En verdad, concluí, sería de los más curioso que cuatro mil quinientos millones de años de evolución biológica independiente en los dos

planetas hubieran producido idénticos resultados finales, incluso aunque sus medios ambientes no fueran tan distintos.

Se invitó a continuación al abogado defensor, a interrogarme si quería. Indicando que me haría una o dos preguntas, se acercó lentamente al estrado de los testigos y aumentando progresivamente el tono de voz dijo:

— Dr. Sagan, no quiero ser irrespetuoso, pero ¿no es cierto que hace cuatrocientos o quinientos años, los científicos de las facultades universitarias, como usted, mantenían que la Tierra . . . era plana?—

El fiscal se puso en pie de un salto.

— ¡Protesto, señoría!—

El juez le preguntó de qué protestaba. Supuse que basándose en irreverencia, pero no.

— Evidencia común.—

Se mantuvo la objeción y prosiguió la defensa. El juez, que sonreía indistintamente, no había perdido su habilidad de preguntas y respuestas sagaces, pero el jurado conservaba su expresión de frialdad y un tanto cansada.

El abogado defensor estaba perplejo por parte de mi testimonio. Supongo que entendió lo que era la espectroscopía astronómica y cómo se comprobaba en el laboratorio comparándola con el gas en cuestión, amoníaco, por ejemplo. Pero, ¿no había sentado yo una premisa al jurado? ¿No había supuesto tácitamente que en Saturno tienen validez las mismas leyes físicas que en la Tierra?.

De repente, nos habíamos metido en una de las cuestiones básicas de la filosofía de la ciencia en un proceso por fraude en una causa criminal. Había explicado que hay muchas bandas espectrales indicativas de la presencia de un compuesto y que muchas de ellas existen tanto en Saturno como en el laboratorio. La posibilidad de tal coincidencia por casualidad parecía ser muy remota. Iba a explicar cómo demostró Newton que las mismas leyes físicas responsables de la fuerza de la gravedad sobre los objetos en la Tierra son las que originan el movimiento de la Luna. Pero al pasar la vista por el jurado tuve la clara impresión de que había germinado la semilla de la duda. Me los imaginaba preguntando: Después de todo, puede ser que en Saturno *sean* distintas las leyes físicas, ¿cómo puede alguien saberlo?

La defensa me preguntó acerca de la determinación de la temperatura. ¿A qué altura de la atmósfera de Saturno se reflejarían las temperaturas que yo había dicho? Altura en la atmósfera. ¿A qué altura? Bien, quizá a 15000 km sobre la superficie, si es que es verdad. ¿Podrían las temperaturas en la superficie – si la hay – ser considerablemente más templadas? En verdad, sí, repliqué; de hecho yo había hecho una sugerencia similar respecto al planeta Júpiter. ¿Qué temperatura deduciría para el planeta Tierra un observador extraterrestre que pudiera observar únicamente por encima de las nubes? Unos -50 a -60° C. Y todos sabemos que ésa no es la temperatura media en la superficie de la Tierra. ¿No es verdad? Se apuntó un tanto.

— Y ahora, ¿no es cierto que la determinación espectroscópica de la

composición se refiere también únicamente a las capas más altas de la atmósfera? ¿Y no podría ser considerablemente distinta la composición química de las capas bajas de la atmósfera cerca de la superficie? En concreto, ¿no podría contener moléculas de oxígeno, de modo que los seres pudieran respirar como nosotros?

Contesté en términos de equilibrio químico. Es tal la superabundancia de hidrógeno en la atmósfera superior de Saturno, dije, que instantáneamente reaccionaría con cualquier oxígeno que hubiera a su alrededor. Se puede estimar la abundancia de hidrógeno en la atmósfera inferior; se cree que el cuerpo de Saturno es al menos la mitad de hidrógeno metálico. Consideraba muy remota la existencia de oxígeno molecular libre en su superficie. La defensa contestó: — Pero esto son argumentos indirectos. ¿No es verdad? — — Usted realmente *no sabe* que no haya oxígeno en Saturno.— No pude más que dar mi conformidad a que la demostración, aunque convincente, era indirecta. No obstante, la Astronomía se basa en pruebas indirectas.

— Ahora, Dr. Sagan — continuó — he oído decir que en las regiones árticas de la Tierra se han encontrado plantas fósiles que pertenecieron a variedades tropicales. ¿No es verdad? ¿Cómo podía haber plantas tropicales en el polo?— Me pareció haber perdido por completo las riendas de la discusión. Expliqué la evidencia basada en estudios paleomagnéticos de los acopios errantes polares. Las regiones árticas polares actuales de la Tierra fueron un día tropicales porque los polos estuvieron entonces en otra posición geográfica.

— Lo que realmente quiero saber ahora, Dr. Sagan, es esto: en la época en que los polos de la Tierra estaban en los trópicos. ¿Estaban los trópicos actuales en los polos? ¿O, era todo trópico?.

Al llegar a este punto, el fiscal se puso en pie, un tanto resignado.

— Señoría, debo confesar mi incompetencia para comprender la importancia de este sistema de interrogatorio.—

— De acuerdo con la parte fiscal, dijo el juez, la defensa debería esclarecerlo.—

— Bien, Señoría, no es realmente apropiado el caso, pero es un asunto tan interesante, que bien valía la pena mientras teníamos al Dr. Sagan en el estrado. No tengo más preguntas que hacer.—

Descendí del estrado y volví a ocupar mi asiento en la sala.

Al día siguiente, un periódico local, publicaba íntegras las coplas rimadas que Winckler había enviado a la infortunada Sra. Brewster y luego me citaba diciendo que las temperaturas en Saturno eran cientos de grados bajo cero, lo cual resultaba demasiado frío para el amor en cualquier mundo.

El asunto restante de interés sustancial, que estaba dispuesto por considerable conversación *cruzada* entre los representantes del proceso y la defensa, era una película que había hecho Winckler. Se proyectó en la sala con gran regocijo por parte del jurado. Mostraba el aterrizaje de los saturnianos y sus conversaciones y aventuras con Winckler. Por desgracia, Winckler no pudo conseguir ningún saturniano para la película y por eso tuvo que contratar actores que eran indistinguibles de los saturnianos. Además, Winckler había prometido varios primeros papeles en la película a algunos de los amigos de su dama, si bien al menos en el caso de la Sra. Brewster, esta promesa de estrellazgo no se materializó.

Winckler al final fue considerado culpable de fraude y condenado a cárcel, a pesar de los esfuerzos admirables de su defensor. En mis conversaciones con Winckler durante los descansos, me resultaba imposible determinar hasta qué punto sus aventuras con los saturnianos eran un fraude cabal y hasta qué punto las creía él genuinamente. Pero es claro que muchos otros las encontraron en consonancia con lo que creían o les gustaba creer.

La experiencia de Winckler subraya la existencia en la sociedad contemporánea de una necesidad insatisfecha. Casi todas las otras noticias acerca de contactos de seres humanos con tripulaciones de platillos volantes, noticias que deleitan a las sociedades de platillos volantes, siguen la misma pauta y hacen hincapié en los mismos puntos. Los extraterrestres son humanos, con pocas diferencias físicas, ni siquiera pequeñas, de las normas cosméticas locales. (No sé de ningún caso de platillos volantes negros u orientales que se hayan registrado en los Estados Unidos; no obstante, son muy pocas las noticias sobre platillos volantes dadas en ese país por negros u orientales.) Los de los platillos son inteligentes, amables y cariñosos; están interesados por nuestra integridad en esta época de contínuas tensiones internacionales, pero por alguna razón no quieren intervenir por la fuerza. Hace ya muchos años que resolvieron las disputas internacionales en sus propios planetas. Son extraordinarios en humanidades, que naturalmente, sigue siendo materia apropiada para ellos, pero su capacidad máxima es la técnica. En resumen, los seres de los platillos volantes son todopoderosos, sabelotodo y en cuanto a su condición respecto a la humanidad, como un padre para sus hijos. Con todo, no dirigen el curso de los acontecimientos importantes de hoy en día, probablemente en base a que la humanidad tiene que labrarse su propio destino. No puedo más que concluir que las sociedades de platillos volantes representan una religión disfrazada de pocos seguidores y que los tripulantes de los platillos son las deidades del culto.

Con el avanzar de la ciencia en los últimos siglos, han ido pasando a su dominio campos que en un principio eran exclusivos de la religión. Ya no se mantiene que la Tierra está quieta, ni que sea el centro del universo, ni que el mundo se hizo aproximadamente el 23 de octubre del 4004 a. de C., ni que se hizo en siete días, ni que las distintas especies tienen creaciones independientes, ni que el origen del sistema solar y el de la vida estarán por siempre más allá del saber del hombre. Más bien, la síntesis de laboratorio de la vida a partir de materiales que fueron abundantes en el ambiente primitivo de la Tierra no parece más que a unas décadas. Un resultado de estas intromisiones de la ciencia es que parece cada vez como si Dios hubiera tenido menos que hacer. Si al principio del universo creó hidrógeno y estableció las leyes físicas, pudo luego retirarse. Es un *roi fainéant*. Si Dios no creó directa-

mente la vida o el hombre, resulta difícil comprender que quiera intervenir en nuestras vidas o atender nuestras súplicas.

Y, con todo, la tentación de creer en un Dios omnipotente, omnisapiente y todo amor es grande sobre todo hoy en día. La marcha de los sucesos del mundo no está al alcance del individuo normal. No tenemos la seguridad de que mañana no se encuentre el mundo convertido en pira radiactiva. Nuestro destino parece estar a merced de fuerzas que apenas conocemos y que manejamos sólo peligrosamente. Si tan sólo existiera un dios que se interesara por nuestras preocupaciones, que diera la seguridad de nuestra supervivencia y que encajara dentro del marco de la ciencia contemporánea . . . El mito de los platillos representa una clara componenda entre la necesidad de creer en un Dios paternal, tradicional, y las presiones contemporáneas para aceptar los pronunciamientos de la ciencia.

Aunque el culto a los contactos con los platillos volantes es viable y amplio, al menos, en los Estados Unidos, representa solamente una pequeña fracción del número total de entusiastas de los platillos. Existen muchas personas que, de buena fe, han visto en el cielo objetos a los que han llamado OVNI (objeto volante no identificado) y que creen que son de origen extraterrestre racional. La diversidad de estos informes es tan chocante como las propias observaciones. Los OVNIS se han descrito variamente como suspendidos o moviéndose rápidamente; en forma de disco, de cigarro o de balón; moviéndose silenciosamente o con estruendo; con escapes encendidos, con ninguna clase de escape; acompañados de destellos luminosos o de resplandor uniforme plateado. Resulta claro inmediatamente que no todos los OVNIS comparten un mismo origen. En verdad, el uso de un nombre genérico tal como "OVNI" o "platillo volante" ha contribuido a confundir la cuestión por implicar un origen común.

Tal como detalló el astrónomo americano Donald H. Menzel, del observatorio del Harvard College, se han confirmado las identificaciones de OVNIS de lo siguiente; aviones en condiciones meteorológicas anormales; aviones con luces externas no corrientes, globos meteorológicos y otros de gran elevación; satélites terrestres artificiales; bandadas de pájaros; reflejos de focos o proyectores por las nubes; la reflexión de la luz solar en superficies brillantes; organismos luminiscentes, incluyendo el caso de una luciérnaga alojada entre las dos hojas de cristal de la ventana de la cabina de un avión; espejismos; formaciones de nubes lenticulares, rayos en bola, parhelios; meteoros, incluyendo el rayo verde; planetas, sobre todo Venus; estrellas brillantes y las auroras boreales. También se han dado casos de detecciones por radar de objetos voladores no identificados, muchos de los cuales se han explicado en función de reflexiones del propio radar en capas de inversión de temperatura de la atmósfera y de otras fuentes de "parásitos" del radar.

Considerando la dificultad de determinar la forma de las observaciones oculares o de radar –las oculares las hacen por lo general individuos sin experiencia en la observación del cielo– es notable que tan sólo un porcentaje muy pequeño de los OVNIS registrados se han identificado como fenómenos que ocurren en la naturaleza y que ni siquiera son extraños. Es también notable que los astrónomos profesionales, que están acostumbrados al firmamento, y que lo exploran con regularidad con complicados instrumentos, no han fotografiado nunca, en cuanto lo que yo sé, nada que se parezca al OVNI clásico. Por ejemplo, en el proyecto Meteor, de Harvard, llevado a cabo en Nuevo Méjico durante el período de 1954 a 1958, se hicieron abundantes observaciones fotográficas con cámaras Super-Schmidt con angular de 60°. En total se observó una superficie de 7000 km² a 80 km de altura durante un período total de unas 3000 horas. Las observaciones visuales y fotográficas fueron buenas hasta magnitudes inferiores a + 4. (La escala de magnitudes se define en la nota al pie de la página 37 del capítulo siguiente; la magnitud + 4 está próxima a los objetos más tenues visibles a simple vista.) Estas observaciones de astrónomos profesionales se realizaron en un lugar y época caracterizados por los abundantes informes de objetos voladores no identificados. No se detectó ninguno cuya existencia no pudiera explicarse, a pesar del hecho de que se vieron algunos que se movían con rapidez en un estudio de meteoros. Iguales resultados negativos se han obtenido por gran número de astrónomos, que confirman el escepticismo general de la comunidad astronómica hacia las noticias de platillos volantes. No es posible excluir la presencia en raras ocasiones de objetos no identificados en el cielo, pero la abundancia de observaciones de platillos (en los Estados Unidos de uno al día, por término medio) es realmente de objetos astronómicos corrientes y fenómenos atmosféricos –y quizá algunos no tan corrientes– que no han sabido interpretar sus observadores.

La repetición de avistamientos de los OVNIS y la persistencia de las Fuerzas Aéreas de los Estados Unidos y de miembros de la comunidad científica reconocida, esforzándose en explicar dichos avistamientos ha hecho creer a algunos que existe cierta clase de conjuración para ocultar al público la verdadera naturaleza de los OVNIS. Pero precisamente porque el vulgo desea tan intensamente que los objetos voladores no identificados sean de origen humano, inteligentes y extraterrestres, se quiere en justicia que al evaluar las observaciones aceptemos únicamente la más rigurosa lógica y la evidencia más convincente.

Existe también el peligro opuesto. El interés público por los platillos volantes, los informes sobre contactos y la vida extraterrestre en general, ha traído como consecuencia cierta aversión hacia muchos científicos, cuyas afirmaciones tienden a ser deformadas, exageradas y de cualquier otro modo perturbadas por la vox populi. Existe entonces la tendencia a rechazar al punto la posibilidad de inteligencia extraterrestre, como sin fundamento, improbable o no científica. Existen también ptolemaicos ocultos que consideran una amenaza la probabilidad de vida racional extraterrestre.

Un ejemplo típico de este otro extremo destacable se puede hallar en las circunstancias que concurrieron con el primer comunicado de los resultados científicos de la nave espacial Mariner IV, de los Estados Unidos, que

llegó a Marte el día de la toma de la Bastilla (1) de 1965. Entre las primeras noticias estaba el descubrimiento de que en Marte no se detectaba campo magnético. La conclusión que se sacó (y entre paréntesis, bajo ningún concepto segura), fue que Marte carecía de montañas y volcanes y que geológicamente podía considerarse muerto. Algunos sectores de la prensa dijeron entonces que al no poder medir el campo magnético marciano, los científicos habían demostrado la falta de vida en Marte. Verdaderamente, un pensamiento maravilloso del siglo XX. Que yo sepa, no se publicó en ninguna prensa nota alguna aclaratoria o de retracto de la confusión entre estas dos frases de mundo "muerto".

Los resultados magnetométricos fijaron el marco para la interpretación popular de las fotografías del Mariner IV. Primero, a pesar del hecho de que un experimento semejante realizado en la Tierra hubiera sido incapaz de detectar vida en nuestro planeta (véase capítulo 18), como no pudo *verse* vida en Marte, los medios de información dedujeron que era un planeta sin vida. Segundo, tal como se presumía, no se hallaron en Marte signos de extensiones de agua recientes y de ello se concluyó que no había vida en Marte. Finalmente, la existencia de cráteres en la superficie marciana supuso a muchos que Marte está sin vida. El silogismo parecía ser válido: "En la Luna hay cráteres. En la Luna no hay vida. En Marte hay cráteres, luego, en Marte no hay vida".

Las noticias de los periódicos, de las revistas y de la televisión siguen repletas de descripciones de cómo la creencia "tan sostenida" de un Marte cruzado por exuberantes canales y con vegetación se ha abandonado ahora a causa de los descubrimientos decisivos del Mariner IV y ha sido cambiada por la de un mundo sin vida, lleno de cráteres como la Luna. Incluso el a menudo digno de confianza *The Times*, de Nueva York, publicó un editorial titulado "El planeta muerto", citando los hallazgos nuevos supuestos sobre la vida en Marte. Como veremos en los capítulos 19 y 20, estas conclusiones científicas a que llegan los dignatarios de las relaciones públicas y los medios de información no son en verdad justas ni con los esfuerzos concienzudos de fundamento astronómico ni con los sorprendentes y relevantes descubrimientos del Mariner IV. La nave espacial no fue concebida para indagar la vida en Marte. Como los experimentadores tuvieron cautela en decir, la misión no demostró ni excluyó la posibilidad de vida en Marte.

¿Por qué, entonces, fueron tan rápidos los medios de difusión en deducir un Marte sin vida?

Creo que se puede hallar una respuesta parcial en los comentarios de los líderes políticos, de Mr. Billy Graham y de otros teólogos americanos a los descubrimientos del Mariner IV, que son con seguridad los barómetros de las posturas comunes. Evidentemente, fueron *desagraviados*. El encontrar vida fuera de la Tierra –en particular, vida racional, aunque la probabilidad en

(1) N. del T. El 14 de julio (de 1789).

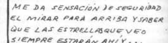
Marte es muy remota– arrebata nuestra esperanza secreta de que el hombre está en la cúspide de la creación, pretensión a la que no puede aspirar hasta ahora ninguna otra especie de nuestro planeta. Hasta las formas más simples de vida extraterrestre pudieran tener facultades y acomodaciones que se nos niegan a nosotros. El descubrimiento de vida en algún otro mundo será para nosotros, entre otras muchas cosas, una experiencia que nos hará más humildes.

La cuestión de vida extraterrestre –y aún más que esto, la cuestión de inteligencia extraterrestre– es pues muchas cosas para muchos hombres. Al confirmar la existencia de vida extraterrestre y al evaluar los cálculos estadísticos de la probabilidad de inteligencia extraterrestre, podemos estar a merced de nuestros prejuicios. En los momentos actuales no hay pruebas inequívocas ni siquiera de variedades sencillas de vida extraterrestre, aun cuando el caso pueda variar en los años venideros. Hay factores inconscientes que operan en los argumentos actuales tanto de los adeptos a la vida extraterrestre como de los detractores de la misma.

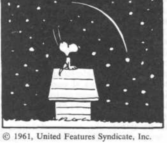
Creo que a Shklovskii y a mí se nos puede describir como optimistas prudentes sobre este asunto. Muchas veces en este libro hemos hecho especulaciones, pero confío que las hemos indicado como tales y dado al lector información suficiente para que pondere la base de nuestras suposiciones. En la parte III, en la que extrapolamos de la tecnología terrestre contemporánea a las extraterrestres futuras, quizá no hayamos sido lo suficientemente cautelosos, aunque más bien sospecho que el caso es al contrario. Es un castigo leer las predicciones del siglo XIX de los acontecimientos para mediados de este siglo. Hasta sus más grandiosas extrapolaciones han resultado ser un eco insignificante de nuestras realidades. Forzó a la imaginación de Julio Verne a describir globos gigantes de pasajeros que transportaban a las personas por el aire a miles de millas tan sólo en una semana. No se podía figurar los transportes a reacción contemporáneos que cubren la misma distancia en unas horas.

Si hemos sido demasiado optimistas o bien no lo suficientemente optimistas, solamente el tiempo lo dirá. ≫











1

El Universo

En un universo cuyo tamaño supera a la imaginación humana, en el que nuestro mundo flota como una mota de polvo en el vacío de la noche, los hombres han crecido inconcebiblemente solos. Exploramos la escala del tiempo y los mecanismos de la propia vida por augurios y señales de lo invisible. Como único mamífero que razona en el planeta - quizá el único animal que piensa en todo el universo sidéreo - se ha desarrollado en nosotros el peso de la conciencia. Observamos las estrellas, pero las señales son inciertas. Desenterramos los huesos del pasado y buscamos nuestro origen. Hay en eso una senda, pero parece perderse. Sin embargo, los caprichos del camino pueden tener su significado y es por eso que nos torturamos.

Loren Eiseley. *The Immense Journey* (1946)

3

Tamaño y estructura del universo

¡Qué maravilloso y admirable modelo tenemos aquí de la vasta magnificencia del universo! ¡Tantos soles, tantas tierras . . . !

Cristiaan Huygens. *Nuevas conjeturas respecto a los mundos planetarios, sus habitantes y producciones* (1670)

Y con una escora tremenda, terrible
Hacia otras galaxias desconocidas
Pesadamente da vueltas la Vía Láctea . . .
Boris Pasternak

≪ El célebre filósofo, religioso y matemático del siglo XVII, Blaise Pascal, expresó su miedo por los grandes espacios entre las estrellas y si desde entonces algunos hombres se hubieran hecho más atrevidos, no por ello otros se hubieran hecho menos miedosos. ≫

La escala del espacio y tiempo que acostumbramos observar en la Tierra y que es parte de nuestras vidas cotidianas, es insignificante cuando se compara con el espacio y tiempo del cosmos. Cuando por primera vez nos percatamos de la inmensidad del universo, nos aterramos y humillamos.

Aunque los astrónomos dedicaran todo su tiempo a especular acerca de esa inmensidad y de los prodigiosos intervalos de tiempo necesarios para la evolución de las estrellas, sería poco lo que conseguirían. El interés principal del astrónomo cuando estudia el cosmos es la interpretación física y matemática de las observaciones, las predicciones sobre observaciones futuras y el desarrollo y perfeccionamiento de sus instrumentos para tales interpretaciones y predicciones. Para ayudarse en lo conceptual de su problema, el astrónomo puede, consciente o inconscientemente, imaginar un pequeño modelo que represente el sistema cósmico en investigación. Por este método puede llegar a la comprensión de las distancias relativas del sistema y a la de los intervalos de tiempo que intervienen.

Yo he dedicado una gran parte del tiempo al estudio de la corona solar y de la Galaxia. ≪ La corona solar es un extenso halo de gas incandescente que rodea al Sol y que puede ser visible durante los eclipses de Sol. La Galaxia es un sistema de estrellas denominado Vía Láctea, (1) al cual pertenece el Sol. La Galaxia está rodeada por un halo de gas llamado corona galáctica (figura 3-1). Naturalmente, los tamaños de las coronas solar y galáctica son muy distintos. ≫ Me las he imaginado siempre como cuerpos irregulares, aproximadamente esféricos con más o menos las mismas dimensiones - unos 10 cm de lado a lado. ¿Por qué 10 centímetros? Esta cifra es del todo arbitraria; útil y fácil de imaginar. He esbozado los contornos de los objetos de mis meditaciones en mi cuaderno, procurando conservar las escalas aparentes del fenómeno. Es claro que estoy al corriente de que las dimensiones de la corona galáctica son al menos 100 mil millones de veces mayores que las de la corona solar y, sin embargo, podría prescindir de esta circunstancia, puesto que el tamaño absoluto carecía de importancia para entender el problema al momento. Cuando las dimensiones reales de un objeto son de verdadera importancia, empleo las matemáticas formales.

1.– N. del T. También se conoce con el nombre de *Camino de Santiago*.

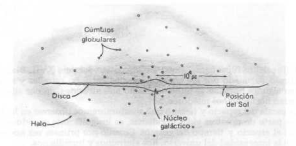


Figura 3-1. Representación esquemática de nuestra Galaxia. El Sol está en un brazo espiral en el disco o plano galáctico, donde la densidad estelar es relativamente baja comparada con la del núcleo. Cuando miramos por encima o por debajo del plano galáctico, vemos solamente las estrellas de nuestra proximidad, pero cuando lo hacemos a lo largo del disco, hacia el núcleo vemos en el cielo una ancha y difusa franja de estrellas a la que llamamos Vía Láctea. En nuestra Galaxia vista de canto. Rodeándola hay una nube esférica de gas caliente llamado halo, que está salpicada con algunas estrellas, la mayoría de ellas en cúmulos globulares.

Hasta hace muy poco se creía que las dimensiones de la Tierra eran inmensas. Hace algo más de cuatro siglos le llevó a Fernando Magallanes y sus hombres casi tres años circunnavegar el globo. (2) Hace menos de cien años que Phileas Fogg, el valeroso héroe de la novela de Julio Verne, con los últimos adelantos de la época dio *La vuelta al mundo en ochenta días*. En 1961 nuestros primeros viajeros del espacio del planeta, Gagarín y Titov, dieron la vuelta al globo en 89 *minutos* en la nave cósmica "Vostok", ≪ así a medida que se han ido construyendo vehículos más veloces, se ha encogido el tamaño aparente de la Tierra, a la vez que ≫ las ideas de los hombres se han vuelto casi involuntariamente a alcanzar el vasto espacio en el cual nuestro minúsculo planeta está más o menos perdido.

2.- N del T. Aunque se ha respetado el texto de la obra original, debe tenerse en cuenta que el período que hemos citado –salió de Sevilla en 1519 con cinco naves, de las que sólo regresó una, la *Victoria* al mando de Juan Sebastián Elcano, el 8 de septiembre de 1522, otra vez al puerto de Sevilla– comprende períodos de invernada, recorrido por las Filipinas, las Molucas, etc y, sobre todo, el navegar por zonas poco conocidas o desconocidas del todo. Magallanes murió durante el viaje en un ataque a la isla de Maetán (Filipinas) el 27 de abril de 1521.

En nuestro sistema solar son nueve los planetas conocidos. La Tierra está situada relativamente cerca del Sol, aunque Mercurio y Venus están más próximos. La distancia media del Sol a su planeta más remoto, Plutón, es cuarenta veces mayor que la existente entre el Sol y la Tierra. Hasta el presente no se sabe si hay planetas más distantes del Sol que Plutón. Sólo podemos especular que si tales planetas existen, son de tamaño relativamente pequeño y que por eso se han escapado de nuestra detección.

El diámetro del sistema solar es aproximadamente de 50 a 100 unidades astronómicas, o unos 10 mil millones de km. (3) En nuestra escala de distancias, es una cifra muy grande, como un millón de veces mayor que el diámetro de la Tierra.

Podemos percatarnos mejor de los tamaños relativos de nuestro sistema solar si imaginamos un modelo a escala. Hagamos que el Sol esté representado por una bola de billar de 7 cm de diámetro; con esa escala, Mercurio, el planeta más próximo al Sol, estaría a una distancia de 280 cm, la Tierra a 760 cm, Júpiter – el más grande de los planetas – a unos 40 metros y Plutón – el más distante – casi a 300 metros de la bola de billar. El diámetro de la Tierra tendría un poco más de 0,5 mm; el de la Luna sería aproximadamente 0,1 mm y el de su órbita alrededor de la Tierra, de unos 4 cm. La estrella más próxima después del Sol, *a* Centauro, (4) habría que colocarla a 2000 km, distancia tan remota que, por comparación, haría aparecer insignificantes las inmensas distancias planetarias de nuestra escala.

El kilómetro, el centímetro, la milla y las demás unidades de medida, se adoptaron por necesidades prácticas del hombre en la Tierra, pero resulta evidente que no son apropiadas para calibrar las distancias cósmicas. En ciencia ficción –y a veces en obras científicas– se emplea el "año luz" para medir distancias interestelares e intergalácticas. Un año luz es la distancia que recorre la luz en un año a la velocidad de 300000 kilómetros por segundo. Puesto que el año tiene unos 3×10^7 segundos, un año luz es aproximadamente $3 \times 10^7 \times 3 \times 10^5 = 9 \times 10^{12}$ kilómetros, o sea 9 millones de millones de kilómetros (9 billones). ≫

La unidad especial de medida empleada normalmente en las obras científicas es el "parsec", definido como la distancia desde la cual el radio de la órbita de la Tierra subtiende un ángulo de un segundo de arco. ≪ Las distancias aparentes en el cielo, tal como se aprecian desde la Tierra, suelen expresarse como medida angular. En la circunferencia hay 360 grados; cada uno de ellos es un grado de arco. Así, un círculo imaginario trazado en el cielo y que pase por nuestra vertical, abarcará 180° de lado a lado del horizonte. Cada

3.- ≪ La unidad astronómica, de símbolo U. A. es la distancia media de la Tierra al Sol, aproximadamente igual a 150 millones de kilómetros.

4.- N. del T.- Rigil kentaurus, estrella doble, tercera entre las más brillantes del firmamento.

grado de arco tiene 60 minutos de arco y cada minuto de arco 60 segundos de arco. Un segundo de arco es realmente una medida angular muy pequeña. ≫ Una moneda que tuviera un diámetro de 1cm, vista desde una distancia de 3 kilómetros, subtendería un ángulo de un segundo de arco. La luna llena subtiende un ángulo de medio grado ≪ Para que el radio de la órbita de la Tierra –150 000 000 km– subtienda un segundo de arco, tiene que ser una distancia tremenda. (5) Esa distancia, el parsec, es igual a 3,26 años luz. ≫

No existen estrellas conocidas dentro de un parsec de nuestro sistema solar. Incluso α Centauro, nuestra estrella más próxima, está a 1,3 parsec. En la escala empleada en la analogía previa para describir el sistema solar, hemos hallado que la distancia a la estrella más cercana es de 2000 km. Nuestro Sol y sus planetas están completamente aislados de los sistemas estelares que hay a su alrededor.

El Sol es un modesto miembro de la enorme colección de estrellas y polvo que denominamos "Galaxia" (del griego *gala*, leche) Esa masa de estrellas que, en una noche sin luna, parece una faja ancha que cruza el cielo, se llama Vía Láctea. Se estima que en ella hay más de 100 mil millones de estrellas de distintos tipos y edades. En su mayoría, se encuentran dentro de un disco gigantesco de aproximadamente 100 000 años luz, cuyo espesor es de unos 1500 años luz.

La Galaxia tiene una estructura extremadamente compleja. Como descripción preliminar, digamos que tiene la forma de un disco aplastado o rueda grande, giratorio. ≪ La figura 3-1 da una visión esquemática e idealizada de nuestra Galaxia vista desde un lugar a un millón de años luz. La región central, densa, en forma de lente, se denomina *disco* y contiene los brazos espirales que nacen cerca del centro y se desarrollan hacia afuera. Sería sorprendente que la Vía Láctea pudiera verse desde arriba o desde abajo, como en las fotografías de otras galaxias (véase la figura 3-2). El disco lenticular está rodeado por un halo más o menos esférico o corona galáctica, cuya composición más apreciable es de gas caliente. ≫

La densidad estelar de la Vía Láctea no es uniforme. La región más brillante, que es la que tiene mayor concentración de estrellas, es el núcleo galáctico, en el cual, de acuerdo con los últimos datos, hay, aproximadamente, 2000 estrellas por parsec cúbico. Esta densidad es mucho mayor que la media estelar en las vecindades de nuestro Sol. Las estrellas tienden también a formar grupos o cúmulos. Las Pléyades (6) constituyen un ejemplo de cúmulo visible a simple vista.

5.– N. del T. 1 parsec $\sim 3{,}08 \times 10^{13}$ km = 206265 U.A.

6.– N. del T. Conocidas vulgarmente por "las Cabrillas".

Figura 3-2. NGC5364 en la constelación de Virgo. Galaxia espiral típica vista de frente. (Cortesía de los Observatorios de Monte Wilson y Monte Palomar.)

Hay ciertos tipos de estrellas que se encuentran en mayor número en unas partes de la Galaxia que en otras. Por ejemplo, las novas gigantes, de mayor luminosidad, concurren principalmente en los brazos espirales cerca del plano galáctico. Las más viejas, de masa pequeña, relativamente, aparecen en mayor número en el centro galáctico. Los denominados cúmulos globulares (figura 3-4), se encuentran principalmente en el centro de la Galaxia, pero fuera de su plano.

Nuestro Sol está localizado muy lejos del centro del disco, en las afueras, a unos 30 años luz del plano galáctico, distancia que resulta relativamente pequeña comparada con el espesor total del disco estelar. La distancia del

Figura 3-3. Las Pléyades, cúmulo estelar "galáctico" o próximo, abierto. Los cuatro rayos que emanan de muchas de las estrellas brillantes de esta fotografía no son intrínsecamente de ellas, sino efectos de difracción producidos en el telescopio reflector usado para tomar la fotografía. (Cortesía de los Observatorios de Monte Wilson y Monte Palomar.)

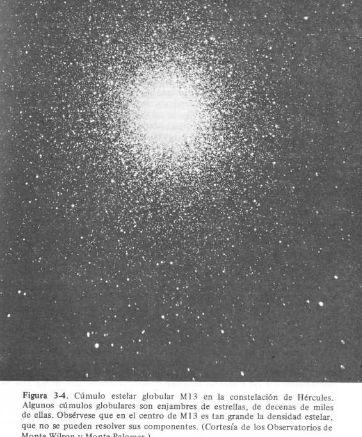


Figura 3-4. Cúmulo estelar globular M13 en la constelación de Hércules. Algunos cúmulos globulares son enjambres de estrellas, de decenas de miles de ellas. Obsérvese que en el centro de M13 es tan grande la densidad estelar, que no se pueden resolver sus componentes. (Cortesía de los Observatorios de Monte Wilson y Monte Palomar.)

Sol al centro galáctico es, aproximadamente, de 33000 años luz, o sea, unos 10 000 parsec.

Los astros se mueven de manera extremadamente complicada dentro de la Galaxia. En primer lugar, participan en la rotación de ésta alrededor de su eje, que es perpendicular al plano de la misma. Este movimiento es distinto al de rotación de un sólido, puesto que la velocidad angular no es la misma en todas partes. El Sol y las estrellas próximas a las inmediaciones solares, región de unos 100 años luz de lado a lado, giran a unos 250 km por segundo. Hay una regla muy sencilla a tener presente: la velocidad de 1 parsec por millón de años es aproximadamente igual a la de 1 kilómetro por segundo. Otras regiones de la Galaxia giran a velocidades mayores o menores. Nuestro Sol invierte unos 200 millones de años en hacer una revolución completa. Puesto que estimamos que nuestro sistema solar existe desde hace unos 5000 millones de años –desde su nacimiento a partir de una nube de gas y polvo hasta su estado actual– podemos concluir que ha efectuado unas 25 revoluciones alrededor del eje de la Galaxia ⩽ (5×10^9 años / 2×10^8 años = 25)⩾ Podríamos pues decir que la edad del Sol es de 25 años galácticos.

Además de este movimiento alrededor del centro galáctico, las estrellas tienen sus movimientos caóticos peculiares propios, cuyas velocidades son considerablemente menores –de unos 10 a 50 km por segundo– aunque los distintos tipos de estrellas se mueven a distintas velocidades. Las estrellas grandes, calientes, participan de las menores velocidades (6 a 8 km por segundo); las semejantes a nuestro Sol, tienen una velocidad de unos 20 km por segundo. Cuanto menor es la velocidad, mayor es el tiempo que una estrella dada pasa en las proximidades del plano galáctico.

⩽ Estos movimientos estelares se determinan de distintas formas. Por ejemplo, podemos comparar placas fotográficas del cielo tomadas con muchos años de diferencia y observar los cambios habidos en las posiciones relativas de las estrellas. Estos movimientos peculiares se registran por medida angular, es decir, segundos de arco por siglo de observación. Para convertir velocidades angulares en velocidades reales –kilómetros por segundo– es preciso saber la distancia exacta de la estrella a la Tierra.

⩽ El método más antiguo y, con todo, el más fundamental para la determinación de distancias astronómicas, es la triangulación, que es el mismo que emplean los topógrafos para calcular la distancia a un punto inaccesible. El astrónomo observa la estrella en cuestión desde dos lugares distintos muy separados y anota el movimiento aparente de la estrella respecto a un fondo de objetos más distantes. Este efecto se puede demostrar fácilmente poniendo un lápiz delante de uno, como a medio metro, y abriendo y cerrando alternativamente un ojo, se ve que el lápiz se mueve respecto al fondo. Cuanto más lejos esté el lápiz, menos se nota que se mueva al guiñar los ojos, pero si tuviéramos los ojos mucho más separados, veríamos que el lápiz se movía aun colocándolo bastante más lejos. De forma análoga, en observaciones astronómicas, cuanto más larga sea la línea de base entre las dos observaciones, mayores son las distancias conmensurables.

⩽ Al principio se hacían las observaciones en observatorios emplazados en distintas partes del mundo; luego, se hicieron en el mismo observatorio, pero transcurridos seis meses entre una y otra observación, de modo que podía utilizarse como línea de base mucho mayor el diámetro de la órbita de la Tierra. Puesto que se conoce el movimiento propio peculiar del Sol respecto a sus estrellas próximas, pueden aprovecharse observaciones entre lapsos de muchos años para tener una línea de base todavía mayor, es decir, la distancia recorrida por el Sol en sus inmediaciones locales en el transcurso de los años.

⩽ Otro método empleado para determinar velocidades se basa en el efecto Doppler. Para las ondas sonoras nos es familiar el efecto Doppler por el cambio de intensidad de la bocina de un automóvil que se acerca o que se aleja. Con las ondas luminosas sucede el efecto Doppler análogo, pues la frecuencia (o color) de la luz cambia de acuerdo con el movimiento de la fuente luminosa. Una estrella que se mueva alejándose de nosotros se hace más roja; una que se nos aproxima, más azul. La espectroscopia astronómica brinda un método muy preciso para medir hasta cambios diminutos de la frecuencia o del color de la luz. Dichas observaciones del efecto Doppler son de particular significado en el estudio de la recesión aparente de las galaxias respecto a nosotros. (Véase el capítulo 10.) ⩾

En el modelo a escala empleado antes en este capítulo, en el cual la Tierra tenía un diámetro de unos 0,05 cm, las dimensiones de nuestra Galaxia serían aproximadamente de 60 millones de kilómetros. Es evidente la imposibilidad de emplear esta escala para hacer patentes las vastas distancias de las demás galaxias del universo. Es necesario, por tanto, establecer otra escala para conceptuar las distancias galácticas.

Imaginemos que la órbita de la Tierra sea del tamaño de la del electrón en el átomo de hidrógeno. ⩽ En el cuadro más simple de este átomo, el más ligero, el hidrógeno está compuesto de un protón central, que es una carga eléctrica positiva, alrededor del cual está en órbita un electrón que tiene una carga eléctrica negativa. Los signos contrarios de estas cargas –una positiva y la otra negativa– proporcionan la fuerza eléctrica que mantiene unido al átomo de hidrógeno, puesto que las partículas con cargas opuestas se atraen respectivamente. ⩾ El radio de la órbita de este electrón es de $0{,}53 \times 10^{-8}$ cm. La estrella más próxima estaría entonces a 0,014 mm, aproximadamente, del núcleo del átomo, el centro de la Galaxia a unos 10 cm y el diámetro de nuestro sistema estelar de unos 35 cm. El de nuestro Sol, sería submicroscópico: de unos $4{,}6 \times 10^{-11}$ cm.

Ya se ha establecido que las estrellas están separadas por vastas distancias; para todos los fines prácticos están aisladas entre sí; por ello casi nunca colisionan aunque los movimientos de cada una de ellas están determinados por la gravitación total de todas las estrellas de la Galaxia. Si consideramos la Vía Láctea como una región cerrada llena de gas, con estrellas separadas que desempeñan el papel de moléculas, se vería que ese gas estaba extraordinariamente enrarecido. La distancia media entre las estrellas es de ⩽ 10^{19} cm. El



Figura 3-5. M31, la galaxia espiral más cercana, la Gran Nebulosa, en la constelación de Andrómeda. Los numerosos puntos brillantes de la fotografía son un primer plano de estrellas en la proximidad solar, de nuestra propia Galaxia. También se ven dos pequeñas galaxias acompañantes, NGC205 la más alejada de M31 y, NGC, que es la que está más cerca. Se aprecian bastante bien las sendas oscuras de M31. (Cortesía de los Observatorios de Monte Wilson y Monte Palomar.)

diámetro del Sol, de unos 10^{11} cm. Así, la distancia relativa media entre las estrellas es de 10^{19} cm/10^{11} cm = 10^{8} cm, o sea, ≫ casi 100 millones de veces mayor que el diámetro medio de las estrellas. En condiciones normales, la distancia media entre moléculas de aire es sólo algunas decenas de veces mayor que las dimensiones de las propias moléculas. El aire tendría que hacerse por lo menos 10^{19} veces menos denso para alcanzar el mismo grado relativo de enrarecimiento que las estrellas en nuestra Galaxia. ≪ Un gas tan enrarecido tendría solamente, más o menos, un átomo por centímetro cúbico. Esta es casualmente la distancia media de la materia en el espacio interestelar. Así, por una curiosa coincidencia, las distancias entre las estrellas en el espacio interestelar, relativas a sus diámetros, son casi las mismas que entre los átomos y las moléculas en el mismo, relativas a *sus* diámetros. El espacio interestelar es como un bloque cúbico vacío, de 90 km de lado, 90 km de fondo y 90 km de altura en el que no hay más que un grano de arena. ≫

Sin embargo, en la región central de la Galaxia en la que la densidad estelar es relativamente mayor, realmente se producen colisiones de vez en vez, una colisión cada millón de años o así. Durante la historia de nuestra Galaxia, que se supone tiene como mínimo 10 000 millones de años, no ha tenido lugar casi nunca un choque de estrellas en sus regiones normales. (Véase el capítulo 12.) Durante varias décadas, los astrónomos han estado estudiando otras galaxias que se parecen a la nuestra en varios aspectos. Este campo de investigación se denomina "astronomía extragaláctica". En los últimos 20 años se han dado grandes pasos para la comprensión de la configuración de la metagalaxia (el sistema de galaxias externas a la nuestra). Aunque la estructura general está resultando cada vez más clara, son todavía muchas las cuestiones que están por contestar. Las enormes distancias que nos separan de esas galaxias crean problemas que sólo pueden resolverse empleando instrumentos de observación más potentes junto con más investigación teórica intensiva.

Las galaxias más cercanas a nosotros son las Nubes de Magallanes, así llamadas porque las vio este explorador en su famoso viaje alrededor del mundo. Se ven con claridad por la noche en el cielo del hemisferio sur, como dos grandes manchas de luz con un brillo superficial casi como el de la Vía Láctea. La distancia a las Nubes de Magallanes es sólo de unos 200 mil años luz —como a unos dos diámetros de nuestra Galaxia. Otra galaxia cercana es la Gran Nebulosa de Andrómeda. (Figura 3-5.) Se ve a simple vista como una mancha luminosa, tenue, de quinta magnitud (7). En realidad, este inmenso

7.- La cantidad de radiación de las estrellas se mide por magnitud estelar. Cuanto menor es la magnitud, más brillante es la estrella. Si una estrella es una magnitud *menor* que otra, es 2,512 veces *más brillante*. Una diferencia de cinco magnitudes corresponde a una relación de brillo de cien. Las estrellas más tenues que las de sexta magnitud no se distinguen a simple vista. Las estrellas más brillantes tienen magnitudes negativas, por ejemplo, la magnitud de Sirius es de −1,6

Figura 3-6. Región del núcleo de la gran galaxia M31. (Cortesía de los Observatorios de Monte Wilson y Monte Palomar.)

Figura 3-7. Periferia de la gran galaxia M31 en la que se aprecia la resolución de sus distintas estrellas. (Cortesía de los Observatorios de Monte Wilson y Monte Palomar.)

Figura 3-8. La galaxia elíptica NGC205, acompañante de la gran galaxia M31 de Andrómeda. Obsérvese la resolución de las distintas estrellas en las partes externas de esta galaxia. (Cortesía de los Observatorios de Monte Wilson y Monte Palomar.)



Figura 3-9. La galaxia espiral M104 en la constelación de Virgo. Esta galaxia está orientada de modo que la observamos de perfil. Veánse en el disco los prominentes anillos de polvo y la luminosidad de aquél. El objeto con rayos de difracción de abajo, a la derecha, es un primer plano de una estrella de nuestra propia Galaxia. (Cortesía de los Observatorios de Monte Wilson y Monte Palomar.)

sistema estelar es casi tres veces mayor que nuestra Galaxia, tanto en unidades o estrellas, como en masa total. La Galaxia de Andrómeda -llamada M31 por los astrónomos porque su número es el 31 en el catálogo del astrónomo francés del siglo XVIII, Messier- está a unos 1,8 millones de años luz o a casi 20 veces el diámetro de nuestra Galaxia. La Gran Nebulosa tiene una estructura en espiral claramente definida y características semejantes a las de la

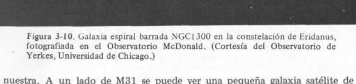


Figura 3-10. Galaxia espiral barrada NGC1300 en la constelación de Eridanus, fotografiada en el Observatorio McDonald. (Cortesía del Observatorio de Yerkes, Universidad de Chicago.)

nuestra. A un lado de M31 se puede ver una pequeña galaxia satélite de forma elíptica.

⋞ En la figura 3-6 se ve una fotografía detallada de la región del núcleo galáctico de M31. Los puntos blancos brillantes son estrellas en primer término pertenecientes a nuestra Galaxia. La fotografía no resuelve las distintas estrellas del núcleo de M31. Se pueden apreciar senderos oscuros de polvo y gas. Sin embargo, en la figura 3-7, de la periferia de M31, está conseguida la resolución de las distintas estrellas. Esto también es válido para la figura 3-8, que es la fotografía de la galaxia acompañante NGC 205 (cotéjese la figura 3-5).



Figura 3-11. La galaxia espiral NGC 7331 en la constelación del Pegaso. En esta fotografía se aprecian también otras galaxias. (Cortesía de los Observatorios de Monte Wilson y Monte Palomar.)

En las figuras 3-9, 3-10 y 3-11, se presentan otras tres galaxias en espiral: una vista de perfil y las otras dos más o menos de frente. Estas galaxias están demasiado distantes de nosotros para poder resolver sus estrellas. Los nódulos brillantes que se ven en ellas son cúmulos globulares o extensas regiones incandescentes de gas hidrógeno. Obsérvense en esas fotografías las bandas oscuras. ⋟

Las Galaxias difieren grandemente entre sí tanto en tamaño como en forma. Además de los sistemas espirales, subdivididos en grupos *a*, *b* y *c* de acuerdo con el desarrollo de la espiral, existen las galaxias "elípticas" -como

la pequeña satélite de M31 mencionada anteriormente- y galaxias irregulares, como las Nubes de Magallanes.

Muchos de estos sistemas estelares se pueden observar con telescopios grandes. Sólo unos 250 de ellos son más brillantes que la duodécima magnitud. No obstante, hay al menos 50 000 galaxias más brillantes que la quinta magnitud. Los sistemas más tenues que se pueden fotografiar con el telescopio reflector de 200 pulgadas de Monte Palomar tienen una magnitud de +24. Los sistemas estelares de esta magnitud pueden estar a distancias de miles de millones de años luz. La luz que impresiona en la placa fotográfica la imagen de una galaxia muy remota, puede haber dimanado de ella cuando se estaban formando las primeras células de los océanos en la Tierra.

≪ Incluso la luz de nuestra más próxima galaxia en espiral de Andrómeda (M31) que impresionó la imagen de la figura 3-6, partió de M31 en la época del Pleistoceno, cuando los megaterios, animales herbívoros de más de dos metros de altura, vagaban por lo que ahora es el sudoeste de los Estados Unidos y cuando en algún lugar al este del Atlántico, iban emergiendo gradualmente por un proceso evolutivo los primeros homínidos con habilidad manual. El tema entero de la astronomía extragaláctica está basado en la luz que partió de esas remotas galaxias en tiempos prehistóricos, cuando el hombre todavía no pisaba la Tierra.

≪ Los astrónomos no están limitados a las observaciones de longitudes de onda visibles, a las que es sensible el ojo. Existen muchas otras longitudes de onda que no las detecta el ojo de por sí. Todo objeto a cualquier temperatura por encima del cero absoluto (−273° C) radia, de alguna manera, las longitudes de onda del espectro electromagnético. Esto se denomina emisión "térmica" porque no depende de ningún mecanismo especial de emisión, sino simplemente del calor del objeto.

≪ En muchos aspectos, la luz tiene propiedades ondulatorias. La distancia de cresta a cresta en las ondas luminosas -como en las del agua- se llama longitud de onda. El número de ondas que pasan por un punto fijo en un tiempo determinado (digamos, un segundo) es la frecuencia de la onda y puede medirse por crestas o por ciclos por segundo (c p s). Pensando un poco podremos percatarnos de que la longitud de onda λ y la frecuencia ν (letra griega nu) están relacionadas con la velocidad de la luz c mediante la fórmula $\lambda\nu = c$.

≪ No obstante su naturaleza ondulatoria general, la luz también puede considerarse compuesta de paquetes discretos de energía denominados cuantos o fotones. La energía del fotón es proporcional a su frecuencia ν. Así pues, cuanto mayor es la frecuencia (longitud de onda más corta), los fotones son más energéticos y penetran más en la materia.

≪ El espectro visible está comprendido entre las longitudes de onda de 4×10^{-5} cm y 7×10^{-5} cm. Otra unidad de longitud empleada para la luz es el Ångström (símbolo Å): $1 Å = 10^{-8}$ cm. Así pues, la luz visible queda entre 4×10^{-5} cm $\times 10^{8}$ Å/cm = 4000 Å y 7×10^{-5} cm $\times 10^{8}$ Å/cm = 7000 Å, que corresponden respectivamente, al violeta intenso y al rojo intenso.

Las longitudes de onda inferiores a 4000 Å, están en la región ultravioleta del espectro; las inferiores a unos 100 Å, en la de rayos X y las inferiores a 1 Å, en la de rayos gamma. Como las longitudes de onda más cortas penetran más profundamente en la materia, los rayos X se utilizan en diagnosis médica. Las longitudes de onda superiores a 7000 Å quedan en la región infrarroja. Cuando los cuerpos absorben luz infrarroja, sus átomos constituyentes son inducidos a vibrar, fenómeno al cual llamamos calor en un sólido; por esta razón la radiación infrarroja se llama también radiación de calor. Su longitud de onda se expresa corrientemente en unidades de micrómetros (μm): $1\mu m = 10^{-4}$ cm = 10^{4} Å. Las longitudes de onda superiores al mm quedan en la región de las ondas de radio del espectro. ≫

Entre las galaxias hay algunas que radian excesivamente grandes cantidades de energía a frecuencias de radio. Se denominan "radiogalaxias". El flujo de radiación de ondas de radio puede exceder muchas veces al correspondiente de radiación visible. El ejemplo clásico de estas galaxias es Cygnus A. En términos de radiación visible esta galaxia aparece como dos manchas insignificantes de luz de decimoséptima magnitud (figura 3-12). Sin embargo, la emisión real absoluta de luz visible es muy grande -unas diez veces la de nuestra Galaxia. Se nos presenta tenue porque dista algo así como 600 millones de años luz. El flujo de radiación de ondas de radio que nos llega procedente de Cygnus A es tan grande en longitudes de onda que excede al del Sol en sus períodos de poca actividad de las manchas solares. Pero entonces el Sol está muy cerca -sólo a 8 minutos de luz- en comparación con los 600 millones de años luz para Cygnus A. El flujo de radiación es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia.

En luz visible, los espectros de la mayoría de las galaxias son semejantes al del Sol. ≪ Se puede ver uno de estos espectros cuando la luz del Sol o cualquier otra clase de luz pasa a través de un prisma triangular de cristal. Los diferentes colores que constituyen la luz del Sol pasan a través del cristal con distintas celeridades y por tanto sufren distintas reflexiones a su paso por el mismo. La luz blanca del Sol se dispersa entonces por el otro lado del prisma formando una banda en la que aparecen los colores del arco iris. Este espectro también puede verse a simple vista y retratarse. La figura 3-13 muestra algunos ejemplos de espectros estelares. Sobre el fondo pueden apreciarse superpuestas rayas de absorción oscuras separadas. Cada raya, a su frecuencia característica propia, puede considerarse debida a la absorción de la luz del Sol (que surge de los niveles profundos del astro) por los átomos de las partes más altas y menos calientes de la atmósfera estelar.

≪ Cada elemento químico tiene su conjunto propio de frecuencias a las que absorbe radiación de modo peculiar. Las rayas de fuerte absorción en los espectros estelares suelen estar causadas por elementos tales como el hidrógeno, el helio, el sodio, el calcio y el potasio. Las más oscuras de estas rayas no corresponden necesariamente a los elementos más abundantes, puesto que algunos átomos tienen rayas de absorción más fuertes que otros. El hidrógeno y el helio son los constituyentes principales de casi todas las estrellas,

Figura 3-12. En el centro de esta fotografía está la radiofuente Cygnus A tal como aparece a frecuencias ópticas. A frecuencias radio es uno de los objetos más brillantes del cielo. A frecuencias visuales, excepto por su naturaleza doble, no tiene nada de particular. (Cortesía de los Observatorios de Monte Wilson y Monte Palomar.)

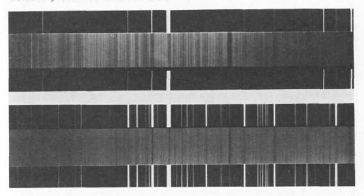


Figura 3-13. Espectros estelares clásicos. En un positivo fotográfico ordinario, las rayas de absorción de los distintos elementos químicos aparecen característicamente oscuros sobre un fondo más brillante. En un negativo, al revés: blancas sobre un fondo más oscuro. La longitud de onda de la luz aumenta por lo común de izquierda a derecha en un espectro de estos. El espectro visual completo, en color se vería purpúreo a la izquierda y luego, progresivamente, azul, verde, amarillo, anaranjado y rojo, en el extremo de la derecha. (Cortesía del Observatorio de Yerkes.)

mientras que el sodio, el calcio y el potasio están presentes en cantidades menores relativamente. Sin embargo, las rayas del calcio no pueden ser nunca más fuertes que las del helio. La comparación con mediciones de laboratorio pueden tener en cuenta este efecto. Por tanto, se puede determinar la composición química de estrellas remotas a partir de la luz que nos irradian y la interpretación de la misma por los métodos de la física moderna.

≪ Los espectros de las galaxias también presentan características de absorción oscura, en circunstancias comprensibles, puesto que la radiación visible de estas galaxias consta de la radiación acumulativa de miles de millones de estrellas más o menos semejantes a nuestro Sol y a las estrellas de los alrededores solares. Se puede tener así una información de conjunto respecto a la composición química formada por galaxias que se encuentran a millones de años luz, lo que en verdad es un logro extraordinario de la mente humana. ≫

Por medición del desplazamiento de las longitudes de onda en el espectro de una fuente de luz respecto a un laboratorio referencial y haciendo uso del efecto Doppler, antes mencionado, podemos determinar si la fuente de luz se aproxima o se aleja de nosotros. En el primer caso, se acor-

tan las longitudes de onda y las rayas del espectro se desplazan hacia el azul. Si por el contrario se aleja, se alargan las longitudes de onda y las rayas sufren un desplazamiento hacia el rojo.

≪ Hace unos pocos años el astrónomo americano V. M. Slipher, del Observatorio de Lowell hizo un descubrimiento muy importante respecto a los espectros de las galaxias. ≫ Las rayas espectrales de todas las galaxias, excepto de aquellas muy próximas a nosotros, sufren un desplazamiento hacia el extremo rojo del espectro, fenómeno que se denomina "corrimiento hacia el rojo" y, como más tarde halló el astrónomo americano Edwin Hubbel del observatorio de Monte Wilson, este desplazamiento aumenta con las distancias crecientes de las galaxias. La explicación más sencilla es que todas las galaxias se están alejando de nosotros y que la velocidad de esa "expansión" aumenta con la distancia. Cuanto mayor es ésta, más deprisa se aleja la galaxia. Las velocidades de esos alejamientos se hacen enormes. La de la radiogalaxia Cygnus A es casi 16000 km/s, y la de una muy débil, la 3C-295, muy superior, ópticamente es de vigésima magnitud. En 1961 se obtuvo su espectro (véase la figura 3-14) y aparece que las rayas ultravioletas producidas por el oxígeno (ionizado) están desplazadas hacia la región naranja del espectro. Por tanto, mediante simple cálculo, hallamos que la velocidad a que se retira de nosotros es de 138000 km/s, casi la mitad de la velocidad de la luz. Esta radiogalaxia está de nosotros a cinco mil millones de años luz. ≪ Más recientemente y por métodos semejantes, se han detectado objetos que están aún más distantes. ≫ Los astrónomos están en la actualidad investigando luz que inició su larga andadura por el espacio cuando se estaban formando el Sol y los planetas.

Además de la expansión general del universo, las galaxias de por sí tienen movimientos propios irregulares, desordenados, cuyas velocidades suelen ser de varios cientos de kilómetros por segundo. Como la velocidad de expansión aumenta a razón de unos 100 km/s cada millón de parsecs, las celeridades irregulares exceden a la velocidad de recesión en aquellas galaxias que se encuentran dentro del millón de parsecs de la Vía Láctea y, por tanto, no pueden detectarse sus corrimientos hacia el rojo. En realidad, algunas de las galaxias más próximas se nos están acercando.

Las galaxias no están distribuidas uniformemente en el espacio metagaláctico sino que forman grupos y cúmulos y fuera de éstos, su frecuencia no llega a la décima parte de la que se observa en el interior. Hay un grupo de diecisiete galaxias, entre las que se incluye la nuestra, que componen el denominado "grupo local" que, a su vez, es parte de un cúmulo mayor cuyo centro está en la región del cielo en que se encuentra la constelación de Virgo. Se supone que este gran cúmulo contiene varios miles de galaxias. ≪ La figura 3-15 muestra un cúmulo de galaxias de la constelación de Hércules, en el que pueden apreciarse galaxias elípticas, espirales e irregulares. Algunos cúmulos pueden tener tanto como miles de galaxias. ≫

Consideremos ahora la diferencia entre los cúmulos galácticos y los este-



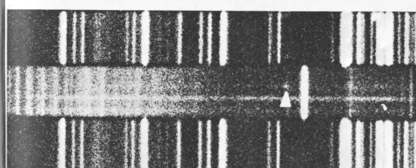


Figura 3-14. La fotografía superior corresponde al objeto 3C295 en la constelación de Bootes. Está a unos 5 mil millones de años luz y es una radiofuente de ruido cósmico. La fotografía inferior corresponde a tres negativos de espectros. El superior y el inferior se obtuvieron en el laboratorio para establecer los módulos de longitud de onda. El espectro del centro se tomó de 3C295 a través de la atmósfera terrestre. La mayoría de sus rayas se deben a los átomos y moléculas de nuestra atmósfera. No obstante, la flecha señala una característica que no aparece en el espectro del cielo y que se debe a 3C295. Es una raya que ha experimentado un gran corrimiento hacia el rojo y que constituye una de las razones más poderosas para atribuir esa enorme distancia a 3C295. Dada la debilidad de tales rayas, hay que proceder con mucho cuidado al obtener e interpretar estos espectros. (Cortesía de los Observatorios de Monte Wilson y Monte Palomar.)

Figura 3-15. Cúmulo de galaxias en la constelación de Hércules. Pueden verse galaxias espirales, elípticas e irregulares, con distintas inclinaciones respecto a la visual. Algunas están unidas por puentes luminescentes. Los objetos con rayos y muchos de los pequeños perfectamente redondos, son un primer plano de estrellas de nuestra propia Galaxia. (Cortesía de los Observatorios de Monte Wilson y Monte Palomar.)

lares. En éstos, el número de estrellas es mucho mayor que el de galaxias en los primeros. Las distancias entre las estrellas de un cúmulo son muy grandes comparadas con sus tamaños, mientras que las distancias entre las galaxias de un cúmulo galáctico son solamente de unas pocas veces sus dimensiones. Si nos imaginamos a todas las galaxias del cielo como un gas en el cual aquéllas representan las moléculas, este medio sería muy viscoso y poco parecido a un gas normal. (En muchos problemas de astronomía metagaláctica, es conveniente con frecuencia considerar el medio metagaláctico como continuo, con características tales como viscosidad, conductividad eléctrica, etc.)

Y ahora, volvamos a nuestro segundo modelo, en el cual la órbita de la Tierra se reducía a las dimensiones de la órbita del primer electrón del átomo de hidrógeno. Con esa escala, la distancia a la galaxia de Andrómeda sería un poco más de 6 metros; a la parte central del sistema local de galaxias de la constelación de Virgo, de unos 120 metros; a la radiogalaxia Cygnus A, 2,5 km y a la radiogalaxia 3C-295, de unos 25 km.

Con estas ideas podemos formarnos un concepto de las dimensiones y características estructurales del universo tal como es hoy. El cuadro antiguo de un universo estático, hay que cambiarlo por el de uno dinámico lleno de objetos cósmicos en continua evolución. Todo cambia: nacen estrellas, crecen y mueren; se desarrollan nubes de gas y polvo y galaxias; todo está en movimiento. ≪ El universo está poblado de planetas, estrellas, galaxias, que se disipan en la inmensa escala del tiempo cósmico, son entidades efímeras que se forman, parpadean un instante y luego desaparecen gradualmente perdiéndose para siempre en los recónditos infinitos del espacio y del tiempo. ≫

≪ Un átomo neutro es aquel que carece de carga eléctrica neta. En el de hidrógeno que antes se citó, la carga eléctrica positiva del protón del núcleo está exactamente equilibrada por la carga eléctrica negativa del electrón, de modo que, desde fuera, el átomo es neutro eléctricamente. De modo análogo, el átomo que sigue en orden de complejidad, el helio, es neutro eléctricamente porque su núcleo contiene dos protones (positivos) y dos neutrones (neutros) y giran a su alrededor dos electrones. Si por alguna razón, por ejemplo, por colisión con otro átomo o por absorción de luz, resulta que el helio pierde un electrón, se dice que está "ionizado". Tendría entonces una carga neta positiva, puesto que habría más protones cargados positivamente en el núcleo que electrones cargados negativamente fuera del mismo. Las propiedades de absorción de los átomos ionizados son distintas a las de los mismos átomos cuando son neutros. Cuando aumenta la temperatura de una estrella, también aumenta el número relativo de átomos ionizados de una clase dada, debido a la elevación tanto del número de colisiones como del número de absorciones. Además, cuando aumenta la temperatura, los compuestos químicos sencillos tales como el CN, se disocian, se rompen, por las colisiones con sus vecinos que se mueven más deprisa y por el bombardeo de fotones de alta energía. ≫

Al aumentar la temperatura de la superficie, se desvanecen las características de absorción del espectro molecular, son muchas las rayas de los átomos neutros que disminuyen en intensidad y aparecen las del helio ionizado. Las estrellas con temperatura superficial de aproximadamente 6000 K presentan rayas de calcio ionizado hacia el extremo del espectro visible y principios del ultravioleta. Nuestro Sol tiene un espectro así. Las estrellas con temperatura superficial de aproximadamente 10000 K presentan rayas intensas de hidrógeno y aquellas cuya temperatura excede de los 20000 K presentan rayas de helio ionizado o neutro en su mayoría y el espectro continuo es muy intenso en las regiones del ultravioleta.

La serie espectral del grueso de las estrellas (clasificadas según sus espectros) se designa por la sucesión arbitraria siguiente de letras: O, B, A, F, G, K, M. La tradicional regla nemónica (entre la gente de habla inglesa) para recordar esta sucesión de letras, es la frase inmortal, "*O*h *Be A F*ine *G*irl, *K*iss *M*e (2).

≪ Cada letra indica una clase de espectro: la O corresponde a la estrella más caliente y la M a la más fría. Las mediciones son tan sensibles, que puede dividirse cada clase en 10 subclases, como B1, B2, B3, etc. Una estrella a la que corresponda, por ejemplo, un espectro B9, se aproxima más a la clase A1 que a la B1.

≪ Las figuras 4-1 a 4-4 ilustran este cambio de las propiedades espectrales según la clase. Cada franja horizontal corresponde al espectro de una estrella determinada de nuestra Galaxia. Cada una de las estrellas que apare-

2.- ¡Oh! Sé una buena chica, bésame.

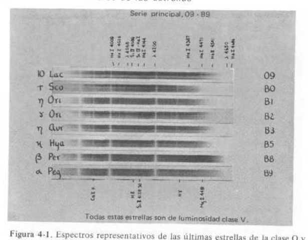


Figura 4-1. Espectros representativos de las últimas estrellas de la clase O y primeras y últimas de la clase B de la serie principal, reproducidos del atlas Morgan-Keenan-Kellman, por cortesía del Observatorio de Yerkes.

cen corresponde a la "serie principal", que es la categoría a la que pertenecen la mayoría de estrellas. Los espectros están tomados del atlas Morgan-Keenan-Kellman, cuyo nombre corresponde a sus recopiladores, astrónomos americanos pertenecientes en su época al observatorio de Yerkes, de la Universidad de Chicago. A la izquierda de cada franja se lee el nombre de la estrella a que corresponde y, a la derecha, el tipo de espectro, ordenados secuencialmente. Cada espectro es un "negativo", es decir, para fines de presentación, se muestran las rayas de absorción como brillantes sobre fondo oscuro en vez de como rayas oscuras sobre fondo brillante, que es como normalmente se observan. En la primera y última banda se indican las distintas rayas espectrales según comparaciones de laboratorio. También se marca el átomo que origina la absorción, su estado de ionización y la longitud de onda a que absorbe. Por ejemplo, He I 4009 corresponde a la absorción de helio neutro a longitud de onda de 4009 Å; el fondo aparecería azul en la proximidad de esta raya, si es que fueran en color las fotografías de las figuras 4-1 a 4-4. Helio II indica helio ionizado parcialmente, es decir, que ha perdido un electrón. Si IV, átomos de silicio que han perdido tres electrones. Los nombres de las distintas estrellas colocados en el borde izquierdo de esas figuras, muestran también una variedad de sistemas de nomenclatura, patri-

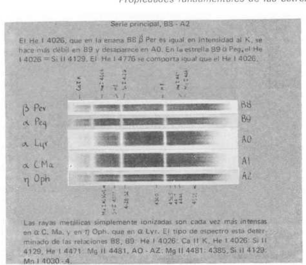


Figura 4-2. Espectros representativos de las últimas estrellas de la clase B y primeras de la clase A de la serie principal, reproducidos del atlas Morgan--Keenan-Kellman, por cortesía del Observatorio de Yerkes.

monio de una convención de clasificación astronómica venerable en la cual cada uno de los distintos observadores recopila su propio catálogo. ≫

≪ Los que inventaron esta clasificación de las estrellas por su tipo espectral, pretendieron en principio que se representaran por orden alfabético –A, B, C, D, etc.– los tipos espectrales de la serie. Sin embargo, después de haber asignado las letras originalmente a los distintos tipos de espectros, se comprobó que por errores en la clasificación se habían puesto letras a tipos de espectro inexistentes o insignificantes, de modo que, luego, para las existentes, no había una transición suave entre dos tipos correlativos. Una estrella del último tipo espectral O, tiene un espectro muy parecido al de una estrella del tipo inicial B. (Véase la figura 4-1.) Así pues, tuvo que colocarse el O delante del B y éste delante del A y reordenar casi al azar todo el alfabeto astronómico. Es un caso interesante del conservatismo humano el que este error de tipo oficinista se guarde como reliquia por el uso repetido, sin que haya esperanza hoy dia de adoptar otro sistema. No obstante, como el orden de las letras en el alfabeto también es arbitrario, la nomenclatura astronómi-

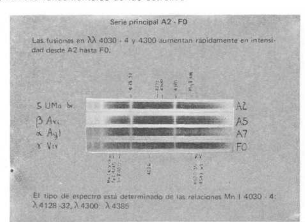


Figura 4-3. Espectros representativos de las primeras y últimas estrellas de la clase A y primeras de la clase F de la serie principal, reproducidos del atlas Morgan-Keenan-Kellman, por cortesía del Observatorio de Yerkes.

ca de los tipos de espectros no es, en esencia, mucho más oscura que la de un alfabeto de verdad. ≫

La luminosidad de una estrella a otra difiere grandemente y suele expresarse en función de la del Sol, cuyo valor es de 4×10^{33} erg/s.

≪ La unidad básica de masa del sistema métrico es el gramo. Un ergio es la unidad de energía consumida al elevar en la Tierra un gramo a una altura de 10^{-3} cm. Es una magnitud verdaderamente pequeña, aplicable quizá a las moscas. La producción de una lámpara de 100 watt es de 10^9 erg/s. Así, pues, la del Sol equivale a la de cuatro millones de millones de lámparas de 100 watt. ≫

La vasta mayoría de las estrellas son "enanas", que son significativamente menos luminosas que nuestro Sol; tanto como mil veces menos luminosas. Sin embargo, las "supergigantes" (relativamente pocas en número) tienen luminosidades que son de 10^4 a 10^{10} veces mayores que la del Sol.

≪ Es corriente, en astronomía, referirse a ciertas categorías amplias de estrellas por sus tamaños relativos o por sus colores. El "circo astronómico" está repleto de "supergigantes", "gigantes", "enanas" y "subenanas", pero no tiene individuos de estatura normal y la simple propuesta de la evolución

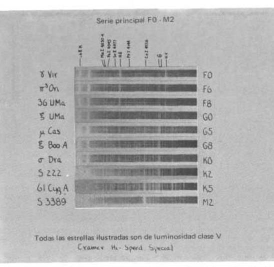


Figura 4-4. Espectros representativos de las estrellas de las clases F, G, K y primeras de la clase M de la serie principal, reproducidos del atlas Morgan--Keenan-Kellman, por cortesía del Observatorio de Yerkes.

solar suele sonar como una excursión al mundo de los hermanos Grimm. Una estrella típica empieza su vida con buenos auspicios, como una gigante amarilla brillante y luego, al comienzo de su adolescencia metamorfosea a enana amarilla. Después de pasar casi toda la vida en ese estado, se expande rápidamente y se convierte en gigante roja luminosa, salta la brecha de *Hertzsprung* y se contrae violentamente a enana blanca caliente, y temina su vida –enfriándose irremisiblemente– como enana negra degenerada. Pocos lectores recordarán el título original de esta historia de la vida un tanto desalentadora, aunque algunos la encontrarán vagamente familiar. Para comprender las causas fundamentales de los varios cursos de las estrellas, hemos de hablar de algo más sobre observaciones astronómicas y sus interpretaciones. ≫

La magnitud aparente de una estrella es una medida de su brillo aparente, es decir, del brillo con que se nos aparece. La magnitud aparente depende, por tanto, del brillo intrínseco y de su distancia a nosotros. Hasta una estrella muy brillante aparecerá casi invisible si está muy lejos. Las estrellas brillantes corrientes, visibles a simple vista en una noche normal, son de magnitudes aparentes, la mayoría, entre 1 y 4. (Una estrella de primera magnitud es más brillante que otra de cuarta magnitud.) ≫ Las estrellas muy brillantes tienen magnitud aparente negativa. La mayoría tienen magnitudes positivas pequeñas. La magnitud aparente del Sol –desde luego, mucho más brillante que las estrellas– es de −26,8. Sin embargo, si lo trasladáramos a una distancia de 10 parsecs (como unos 2 millones de veces más lejos de lo que está), su magnitud aparente sería de + 5 y aparecería como un minúsculo punto de luz en el cielo, apenas visible a simple vista. Las estrellas más débiles que pueden verse a simple vista son de magnitud +6.

Si situamos cualquier estrella a la distancia patrón de 10 parsecs del sistema solar, la magnitud que tiene entonces, se denomina "absoluta". Las estrellas de alta luminosidad intrínseca tienen magnitudes absolutas negativas, por ejemplo, −7 ó −5; las de luminosidad intrínseca baja tienen magnitudes positivas grandes, por ejemplo, +10, +12, etc.

La masa estelar, en contraste a la luminosidad, varía de una a otra estrella dentro de límites estrechos relativos. La masa de nuestro Sol es de 2×10^{33} g –más de 330000 veces la masa de la Tierra. Son pocas las estrellas que tienen masas superiores o inferiores a diez veces la del Sol.

Los radios difieren grandemente de estrella a estrella. Las dimensiones de las enanas blancas no exceden a las de la Tierra, pero son de densidad enorme, que va de 10^4 a 10^5 g/cm³. ≪ Como comparación, la densidad del agua es de 1 g/cm³ y la media de las rocas, de unos 3 g/cm³. ≫ Otras estrellas tienen diámetros de tan inmensa magnitud, que cabría perfectamente dentro de ellas toda la órbita de Marte. Esas estrellas tan grandes se llaman a veces "globos". Como en comparación hay poca variación en las masas de las estrellas, una estrella de radio grande tendrá una densidad media baja. La densidad del Sol es aproximadamente de 1,4 g/cm³ o sea un poco más que la del agua. Por contraste, las estrellas "globo" son millones de veces menos densas que el aire.

Las investigaciones de los últimos treinta años indican que las estrellas giran alrededor de sus ejes respectivos. Resulta claro hoy que las estrellas con distintos espectros giran a distintas velocidades. El capítulo 13 se dedicará a esta importante cuestión cosmogónica.

Los análisis espectrales indican que la composición química varía de una estrella a otra. Las gigantes calientes, concentradas en el plano galáctico, son relativamente ricas en elementos pesados, como hierro y silicio, mientras que las de los cúmulos globulares (véase la figura 3-4), bastante más apartadas del plano, apenas los contienen diez veces menos. Este importante hecho es el punto de partida de las teorías contemporáneas sobre la evolución de las estellas y de los sistemas estelares.

Los constituyentes principales de las estrellas son, generalmente, plasmas de hidrógeno y helio –gas ionizado eléctricamente neutro porque el número positivo de cargas en los iones (es decir, He II) está exactamente equilibrado por el número de electrones negativos libres no unidos a ningún

átomo por fuerzas eléctricas. Los restantes elementos están presentes como impurezas relativamente insignificantes. ≫ La composición química relativa media de las capas exteriores de las estrellas es la que se da en la tabla I, que indica la abundancia de los otros elementos respecto a cada 10 millones de

Tabla I. Abundancia cósmica de los elementos

Atomo	*Peso atómico relativo*	*Abundancia cósmica relativa, en átomos*
Hidrógeno	1,0	10 000 000,
Helio	4,0	1 400 000,
Litio	6,9	0,003
Carbono	12,0	3 000,
Nitrógeno	14,0	910,
Oxígeno	16,0	6 800,
Neon	20,2	2 800,
Sodio	23,0	17,
Magnesio	24,3	290,
Aluminio	27,0	19,
Fósforo	31,0	3,
Potasio	39,1	0,8
Argón	40,0	42,
Calcio	40,1	17,
Hierro	55,8	80,

átomos de hidrógeno. También da, igualmente respecto al hidrógeno, el peso de un átomo de cada uno de los enumerados. La masa de un átomo de hidrógeno es de $1{,}66 \times 10^{-24}$ g. Aunque, con mucho, los elementos más abundantes son el hidrógeno y el helio, no hay una dependencia sistemática clara de la abundancia de átomos sobre el peso atómico. Estas cuestiones de la abundancia se verán más adelante, cuando tratemos de las reacciones químicas conducentes al origen de la vida en la Tierra.

≪ La comparación de la tabla I con las figuras 4-1 a 4-4, pone de manifiesto el hecho de que los átomos más abundantes no son necesariamente los que se distinguen con más facilidad en espectroscopia. ≫

Aunque los elementos denominados pesados (los más pesados que el helio) son escasos comparados con el hidrógeno y el helio, desempeñan una función muy importante en el universo. La luminosidad de una estrella depende de su opacidad a la radiación que se genera en su interior. Muchos de los elementos pesados tienden a ser bastante opacos, de modo que en pequeñas cantidades pueden influir significativamente en las características

de la luz emitida del interior estelar y en la subsiguiente evolución de la estrella.

Los elementos pesados tienen un significado decisivo para la vida en el universo. El papel del carbono en la estructura de la materia viva es bien conocido; igualmente importante para la vida en la Tierra son el nitrógeno, el oxígeno y el fósforo, y para muchas formas de vida, el hierro, el magnesio, el azufre, el potasio, etc. La vida se basa en complicados enlaces de tales átomos. Así, si no hubiera en el universo elementos más pesados que el helio, no habría vida. ¿Significa esto que las estrellas que tienen pocos elementos pesados no pueden tener planetas habitados? trataremos este asunto más

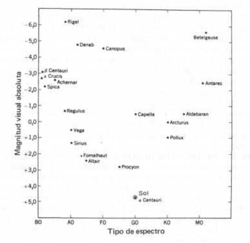


Figura 4-5. Diagrama de Hertzsprung-Russell de las estrellas más brillantes del cielo tomada de la tercera edición de *Milky Way* de Bart J. Bok y Priscilla Bok, Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts, 1957, por cortesía de Harvard University Press.

tarde; aquí simplemente hacemos resaltar la importancia de la composición química de los objetos cósmicos (estrellas, nebulosas, planetas) para investigar las posibilidades de vida en alguna región del espacio.

También se pueden hacer las siguientes preguntas: ¿Estuvieron siempre presentes los elementos pesados? y si no fue así ¿cómo se formaron? Existen

ciertas pruebas de que en el pasado remoto hubo cantidades significativamente menores de elementos pesados a las actuales. Quizá no había ninguna y el universo consistía solamente en hidrógeno y helio. La formación de estos elementos se tratará en el capítulo 8.

Por métodos espectroscópicos, los astrónomos han detectado la presencia de poderosos campos magnéticos en las atmósferas de ciertas estrellas. La intensidad en casos particulares puede ser tan grande como 10000 gauss, es decir, 20000 veces mayor que la del campo magnético superficial de la Tierra (cuya intensidad es, aproximadamente, de 0,5 gauss). Se observa que las manchas solares tienen campos magnéticos que alcanzan intensidades de 3000 a 4000 gauss. Los fenómenos magnéticos, como se ha visto recientemente, desempeñan un papel importante en los procesos físicos que ocurren en la atmósfera solar. Existe cierto fundamento para suponer que lo mismo es cierto en otras atmósferas estelares. A primera vista podría parecer que el magnetismo estelar no guarda relación con el problema del origen y desarrollo de la vida en el universo. Sin embargo, cuando se considera como un todo la serie de sucesos, conduce a que el origen de la vida es extremadamente complejo. Cuando consideremos en el capítulo 13 las teorías sobre el origen de los planetas, veremos que los efectos magnéticos de una estrella desempeñan una función crítica en la formación de los sistemas planetarios.

Hemos hablado de las características básicas de las estrellas, pero ¿existe alguna relación entre ellas? Parece ser que, en realidad, existe tal relación y que fue descubierta por separado hace unos cincuenta años por el astrónomo danés E. Hertzsprung y el americano Henry Norris Russell, de la Universidad de Princeton.

La figura 4-5 reproduce un diagrama de Hertzsprung-Russell en el que los puntos representan las estrellas más brillantes del firmamento por la noche. El eje de abscisas corresponde a los tipos espectrales de las estrellas, y el de ordenadas, a las magnitudes absolutas. Se ve que la mayoría de las estrellas se hallan dentro de los límites de una franja relativamente estrecha, que va del vértice superior izquierdo del diagrama al inferior derecho. Es la llamada serie principal de las estrellas. ≪ Tiene que haber alguna razón fundamental para que las estrellas no estén esparcidas, más o menos al azar, por todo el diagrama de Hertzsprung-Russell. ≫

En la parte superior derecha se ven algunas estrellas dispuestas sin orden. Sus espectros son de las clases G, K y M y sus magnitudes absolutas están comprendidas entre + 2 y −6. Son las "gigantes rojas", aunque entre ellas hay estrellas amarillas. Si hubiéramos incluido las estrellas que tienen luminosidades aparentes menores, hubiéramos hallado en la parte inferior izquierda del diagrama un número pequeño de estrellas con magnitudes absolutas menores que + 10 y espectros comprendidos entre las clases B y F. Se trata de estrellas muy calientes con poca luminosidad, circunstancias que únicamente pueden darse si sus radios son muy pequeños. En consecuencia, esas estrellas se llaman "enanas blancas".

El número de puntos en el diagrama de Hertzsprung-Russell o de "espectro-luminosidad", no da una representación exacta del número relativo de estrellas de cada clase de espectro dentro de la Galaxia. Las estrellas gigantes con alta luminosidad están representadas en número desproporcionadamente grande porque pueden verse a grandes distancias. Las estrellas

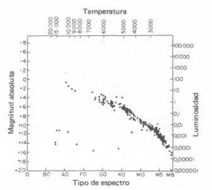


Figura 4-6. Diagrama de Hertzsprung-Russell de las estrellas a menos de 10 parsecs del Sol, reproducido de *Elementary Astronomy* de Otto Struve, Beberly Lynds y Helen Pillans, Oxford University Press, New York, 1959, por cortesía de Oxford University Press.

enanas son difíciles de observar y, de acuerdo con esto, están representadas con menos equidad. Podemos obtener una idea más precisa del número relativo de estrellas de cada clase de espectro si consideramos solamente aquellas que se hallan a menos de 10 parsecs del Sol (32,6 años luz). (Figura 4-6.) En tal caso, vemos que el lado inferior derecho de la serie principal está muy bien definido, si bien hay ausencia de gigantes. Dentro de los 10 parsecs, la abrumadora mayoría de las estrellas son menos brillantes que el Sol y están más frías que éste, ≪ circunstancia que también es clásica en otras partes de la Galaxia ≫; son las "enanas rojas", comprendidas en la parte inferior derecha de la serie principal. Sólo ocho estrellas de este diagrama (entre aproximadamente 170 halladas dentro de esa zona), son más brillantes que el Sol. Se representan ocho enanas blancas. Puesto que dentro del pequeño radio de 10 parsecs observamos tantas enanas blancas, sacamos la conclusión de que son muy numerosas por todo el universo. Los cálculos indican que hay, al menos, varios miles de millones y quizá tantas como diez mil millones en nuestra Galaxia. En la Vía Láctea hay aproximadamente 150 mil millones

de estrellas de todas clases; el número de enanas blancas es diez mil veces mayor que el de gigantes de alta luminosidad, que en tan gran número están representadas en la figura 4-5. Este ejemplo demuestra el importante papel que en astronomía (como en otras ciencias naturales) desempeña la selección de las observaciones.

Hay otras categorías de estrellas. En la figura 4-6 vemos unas estrellas que están algo más abajo de la serie principal: son las "subenanas". Aunque son más bien pocas las subenanas próximas al Sol, su presencia es abundante en las regiones centrales de la Galaxia y en los cúmulos globulares. Raramente se hallan subenanas cerca del plano galáctico, pero son numerosas hacia el centro. Aparentemente, constituyen el tipo más numeroso de la Galaxia. Las subenanas difieren de las estrellas de la serie principal en su contenido relativamente bajo de elementos pesados. ≪ Si a una estrella de la serie principal se le redujera repentinamente de algún modo su contenido en elementos pesados, su luminosidad se incrementaría y se trasladaría hacia arriba y a la izquierda en el diagrama de Hertzsprung-Russell, penetrando en la región de las subenanas, pero quedando todavía bajo la serie principal. El poco contenido en elementos pesados origina una menor absorción de la radiación emitida desde las profundidades de la estrella y por tanto lleva mayores luminosidades. ≫

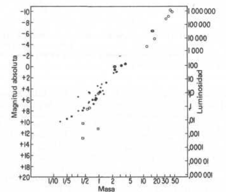


Figura 4-7. Relación entre masa y luminosidad de diversas estrellas. Los cuadraditos que se apartan de la relación masa-luminosidad de la generalidad de las estrellas, corresponden a enanas blancas. Tomada de *Stellar Evolution*, de Otto Struve, Princeton University Press, Princeton, New Jersey, 1950, por cortesía de Princeton University Press.

A medida que avanzamos en la serie principal desde la clase O a la M, aumentan continuamente las masas de las estrellas. Por ejemplo, las estrellas del tipo O tienen una masa que es varias decenas de veces mayor que la del Sol; las de la clase B, una masa aproximadamente cinco veces mayor que la del Sol, que está en la clase espectral G-2. La mayoría de las enanas de la serie principal son de la clase espectral M y tienen masas unas diez veces inferiores a la del Sol. Puesto que la masa y la luminosidad cambian continuamente a lo largo de la serie principal, tiene que haber alguna relación empírica entre ambas. (Véase la figura 4-7.)

Poco después de publicarse el diagrama de "espectro-luminosidad", los astrónomos vieron de modo intuitivo su íntima relación con el problema de la evolución de las estrellas. Primero se creyó que evolucionaban directamente por la serie principal. De acuerdo con estos conceptos ingenuos, las gigantes rojas eran las primeras que se formaban y cuando se condensaban y contraían, aumentaban de temperatura y entraban en la serie principal, donde evolucionaban y se hacían más frías y radiaban menos. La terminología actual de los astrónomos refleja todavía estos venerables conceptos: las clases espectrales O, B, A, y parte de la F, se llaman tipos "primitivos" y las G, K, y M "recientes". Si las estrellas evolucionaran directamente a lo largo de la serie principal, sería necesario llegar a la conclusión que continuamente pierden una parte significante de su masa original. Esos conceptos presentan dificultades insuperables. La teoría moderna de la evolución estelar, basada en los conceptos contemporáneos de la *fuente de energía estelar* y en mucho material observado, desarrollada en la última década, explica satisfactoriamente el diagrama de "espectro-luminosidad", como se verá en el capítulo 6.

La existencia del gas interestelar se descubrió a principios del siglo actual a partir de las rayas de absorción del calcio ionizado que tienen lugar en los espectros de las estrellas calientes remotas, pero que en realidad se deben al calcio del medio interestelar que las separa. La densidad de este gas es extremadamente baja, como de átomo por centímetro cúbico, en promedio, en las regiones próximas al plano galáctico. En el aire hay $2{,}7 \times 10^{19}$ moléculas por centímetro cúbico. Hasta en el vacío más perfecto que puede lograrse en laboratorio, la concentración de átomos mínima no desciende de $10^{13} \times cm^{-3}$. Y, con todo, no podemos considerar el espacio interestelar como un vacío. Este se define como un sistema en el cual el recorrido libre medio de los átomos o moléculas (≪ es decir, la distancia promedio que las partículas recorren entre colisión y colisión ≫) es superior a las longitudes características del sistema. En el espacio interestelar el recorrido libre medio de los átomos es cientos de veces menor que las distancias entre estrellas. En consecuencia, podemos considerar correctamente el gas interestelar como un medio continuo, uniforme, al que se le pueden aplicar las leyes de la dinámica de los gases.

El contenido químico del gas interestelar, revelado por espectroscopia, es similar al de las capas externas de las estrellas de la serie principal: predominan los átomos de hidrógeno y de helio; los metálicos, en comparación, son raros. Los compuestos moleculares más sencillos (como CH, CN) están presentes en cantidades detectables. Se ha postulado que, quizá, una parte significativa del gas interestelar podría ser en forma de hidrógeno molecular, H_2, pero todavía no hay métodos para determinar la validez de esta suposición.

La temperatura del gas interestelar depende de su distancia a una estrella caliente. La radiación ultravioleta de las estrellas calientes de la clase espectral O5 ioniza casi todo el gas dentro de un radio de aproximadamente 100 parsecs. Dichas zonas se llaman "regiones HII" y sus temperaturas pueden llegar a los 10000 K. (La temperatura de un gas se define por las velocidades de los movimientos desordenados característicos de las partículas.) En estas condiciones, el medio emite radiación en la región visible del espectro a distintas frecuencias, sobre todo a las frecuencias características de una raya roja del hidrógeno. Cuando casi toda la materia estelar está lejos de las estrellas calientes, no se ioniza el hidrógeno interestelar y la temperatura del gas es tan baja como 100 K o inferior. Probablemente hay cantidades importantes de moléculas de hidrógeno en esas regiones frías.

Durante los últimos diez años la radioastronomía ha resultado ser muy valiosa para el estudio del gas interestelar; sobre todo, las investigaciones a longitud de onda de 21 cm. ¿Por qué esta longitud? Hace ya algunos años, se predijo teóricamente que los átomos de hidrógeno neutro en las condiciones del espacio interestelar tenían que radiar con una longitud de onda de 21 cm.

≪ A longitudes de onda del ultravioleta, del visible; del infrarrojo y de radio, los átomos emiten o absorben radiación porque sus electrones cambian energía. En el caso del átomo más simple, el del hidrógeno, son muchas las

órbitas posibles del electrón. Un electrón en una órbita lejos del núcleo, tiene más energía que otro en una órbita más cercana. Cuando la órbita del electrón pasa de grande a pequeña, aquél emite su diferencia de energía como fotón de luz. La órbita de energía mínima del átomo de hidrógeno se llama estado "fundamental". En realidad, consta de dos órbitas diferentes con una diferencia de energía muy pequeña. El núcleo del átomo de hidrógeno es un protón, que lleva consigo un pequeño campo magnético, que puede imaginarse orientado en el espacio perpendicular al plano de la órbita del electrón. En esta representación tan sencilla del átomo de hidrógeno, el electrón, al moverse alrededor del núcleo, crea un campo magnético como toda partícula cargada en movimiento. El campo magnético engendrado por el electrón en su revolución alrededor del protón, también puede imaginarse perpendicular al plano de la órbita. Ahora bien, el que el campo del electrón y el campo del protón estén dirigidos en el mismo sentido o en sentidos opuestos, depende del sentido de giro de aquél alrededor del protón, en el de las agujas del reloj o contrario al mismo. Estos dos sentidos de giro corresponden a las dos energías ligeramente diferentes que constituyen el estado fundamental del átomo de hidrógeno. ≫ De acuerdo con las leyes de la física cuántica, las transiciones espontáneas ocasionales tienen lugar del estado de energía fundamental superior al inferior y cuando esto sucede se emite un fotón de baja energía, cuya frecuencia es proporcional a la diferencia entre los dos niveles de energía y, puesto que la diferencia es muy pequeña, la frecuencia de la radiación será baja. La longitud de onda correspondiente es de 21 cm.

Los cálculos indican que estas transiciones entre los niveles de los átomos de hidrógeno ocurren raramente; en promedio, ¡una transición por átomo cada once millones de años! Y para otras rayas del espectro visible, las transiciones quizá ocurren una vez cada cienmillonésima de segundo.

Como observados desde la Tierra los átomos interestelares tienen velocidades diferentes, entonces, por efecto Doppler, no toda la radiación emitida por el hidrógeno estará en la longitud de onda de 21 cm. Los que se muevan hacia el observador emitiran a longitudes de onda menores que 21 cm; los que se alejen, a longitudes de onda mayores y, en consecuencia, habrá una dispersión de longitudes de onda alrededor de los 21 cm. Así, midiendo la amplitud de la raya de los 21 cm, resulta posible determinar el estado de movimiento del gas interestelar en la Galaxia e investigar la rotación galáctica y los movimientos desordenados y temperaturas de las distintas nubes de materia interestelar. También se ha podido determinar el número aproximado de átomos de hidrógeno en el espacio interestelar.

Estos métodos se han empleado para el estudio de otras Galaxias, por ejemplo, la de Andrómeda M31 (figura 3-5). Cuando hayan progresado las técnicas de la radioastronomía, podremos estudiar los movimientos y rotaciones de galaxias muy lejanas. La investigación del hidrógeno estelar en la longitud de onda de 21 cm ha inaugurado una era nueva para la astronomía.

≪ Recientemente, en la longitud de onda de 18 cm, se ha descubierto

otra raya de absorción de radio interestelar, que está producida por el fragmento molecular OH, denominado radical hidróxilo. Que el OH absorbe a los 18 cm, hace ya muchos años que lo predijo Shklovskii. Parece ser que la distribución de OH en el espacio interestelar es distinta a la del H. Como veremos en el capítulo 8, se cree que el oxígeno, pero no el hidrógeno, se sintetiza en las profundidades de las estrellas calientes, de modo que la diferencia en la distribución de oxígeno e hidrógeno en el espacio interestelar puede dar algunas pistas importantes sobre los lugares de generación del elemento dentro de la Galaxia. En los momentos actuales se llevan investigados muchos aspectos del espectro de absorción y emisión interestelar cerca de los 18 cm, pero aún no se han descifrado del todo. Las características espectrales parecen estar localizadas con preferencia próximas a las regiones de HII. Los detalles del espectro han sido muy difíciles de interpretar, sobre todo porque la emisión está muy polarizada y a veces varía en intensidad en un período de meses. Además de para el H y el OH, Shklovskii y otros han predicho las rayas interestelares de otros elementos. Si se descubren y localizan, quizá llegue el día en que se levanten planisferios de las abundancias relativas de distintos elementos químicos por la Galaxia. ≫

Los astrónomos han logrado bastantes pruebas indirectas de la presencia de campos magnéticos interestelares. Estos campos están asociados a nubes de gas interestelar y se trasladan con ellas. Sus intensidades son, aproximadamente, de 10^{-5} gauss. La dirección general de las líneas de fuerza magnética coincide con la de los brazos de la estructura espiral de la Galaxia. Podemos decir que estos últimos representan conductos de fuerza magnética de dimensiones gigantescas. Si el gas interestelar se encuentra en un campo magnético, las rayas de 21 cm tienen que desdoblarse en varios componentes (que no es lo mismo que la polarización). Como la magnitud del campo magnético es muy pequeña, el desdoblamiento será escaso. La amplitud de la raya de absorción también se ve afectada por el campo magnético. ≪ La confirmación de este desdoblamiento magnético y el ensanchamiento de las rayas de radio interestelares, permitirá la determinación más directa de las intensidades de esos campos magnéticos. ≫

Los rayos cósmicos principales que llenan el espacio interestelar están íntimamente relacionados con los campos magnéticos del mismo. Son partículas (protones-núcleos de los elementos más pesados -y también electrones) que frecuentemente tienen energías que exceden de 1 erg por partícula y que a veces se aproximan a $10^6 - 10^7$ erg/partícula. ≪ (El átomo de hidrógeno tiene una masa de $1{,}66 \times 10^{-24}$ g y para que partículas con una masa tan pequeña tengan esas energías tan elevadas, han de moverse a velocidades sumamente rápidas. Los principales rayos cósmicos de alta energía, en realidad tienen velocidades muy próximas a la de la luz.) ≫ Se mueven a lo largo de las líneas de fuerza de los campos magnéticos en trayectorias espirales. Hasta hace poco, los rayos cósmicos sólo podían estudiarse en la vecindad inmediata de la superficie terrestre, pero ahora, gracias a la radioastronomía, se estudian indirectamente en las profundidades de la Vía Láctea e incluso más allá de sus límites, ya que los electrones de los rayos cósmicos emiten ondas de radio. La radioastronomía ha sentado el problema del origen de la radiación cósmica sobre una base científica fuerte.

Hasta hace muy poco, los investigadores que se dedican al problema del origen de la vida, no consideraban la cuestión de la radiación ultraenergética. No obstante y en mi opinión, los rayos cósmicos son un factor esencial en la evolución. La evolución de la vida en la Tierra podría haber sido enteramente diferente si el nivel de radiación de alta energía hubiera sido diez veces mayor de lo que es actualmente: habría aumentado mucho la velocidad o tasa de las mutaciones. Esto da lugar a una pregunta muy interesante: ¿Permanece constante el nivel de radiación cósmica en todos los planetas en los cuales se desarrolla la vida? (No hay que olvidar que estamos considerando períodos de tiempo que abarcan muchos cientos de millones de años.) La radioastronomía y la astrofísica contemporáneas han respuesto a esa pregunta, tal como veremos en el capítulo 7. ≪ Esta opinión de Shklovskii, a juicio mío, no se sustenta fuertemente por las pruebas biológicas existentes. En los capítulos 14 y 17 se hacen algunas menciones a las causas de la evolución y al papel que puede haber desempeñado la radiación en el desarrollo de la vida en la Tierra. ≫

La masa del gas interestelar de nuestra Galaxia es, aproximadamente, mil millones de veces la de nuestro Sol y con todo no es más que un uno por ciento de la masa total de la Galaxia.

La masa restante de la Galaxia corresponde casi toda a las estrellas. En otras galaxias, el contenido relativo de gas interestelar varía grandemente. En las elípticas (figura 3-5), es muy pequeño, de unos 10^{-4} e incluso menos; en las irregulares (como las Nubes de Magallanes) el gas interestelar constituye de un 20 a un 50 por ciento de la masa total de la galaxia. Esta circunstancia está íntimamente relacionada con la cuestión de la evolución de las galaxias, tema que trataremos en el capítulo 9.

6

La evolución de las estrellas

¿Qué pasa luego? ¿Qué sucede cuando se haya destruido toda la Creación, cuando los dioses hayan muerto y los guerreros predilectos y las estirpes de hombres?. . . ¿Habrá entonces dioses otra vez; habrá alguna tierra o gloria?

Ragnarok (1)

1. N. del T. Leyenda escandinava sobre la idea del fin del mundo, cuyo final es que la Tierra vuelve a emerger del mar y renace la vida.

⩽ En una noche clara, podemos alzar la vista al cielo y ver miles de estrellas centelleando. Esas minúsculas cabezas de alfiler luminosas parecen cruzar el cielo desde un punto del horizonte al este a otro punto del horizonte al oeste, mientras la Tierra gira de oeste a este. Sin embargo, sus posiciones relativas aparecen invariables noche tras noche y podemos reconocer ciertos grupos caprichosos de estrellas que semejan imágenes mitológicas o figuras convencionales a las que llamamos "constelaciones" (2). Sabemos por los manuscritos e inscripciones antiguas, que las constelaciones tienen casi la misma forma que hace miles de años -aunque, al igual que sucede con las cuestiones no cósmicas- evocaban distintas imágenes. Sin embargo, si las estrellas hubieran estado formándose, desarrollándose y muriendo en una escala de tiempo de unos pocos miles de años, las constelaciones de la antigüedad habrían sido muy diferentes a las de nuestros días. En consecuencia, podemos concluir que la escala de tiempo evolutiva propia de las estrellas tiene que ser, como mínimo, de diez mil años y quizá mucho mayor.

⩽ Nuestro Sol, en muchos aspectos, es una estrella típica. Su masa, radio, luminosidad y composición química no son extraordinarias. Algunas estrellas son más masivas que nuestro Sol y otras menos; algunas son de mayor radio y otras menores. Las estrellas visibles más brillantes tienen una luminosidad intrínseca mucho mayor que la del Sol; en cambio, las más próximas, intrínsecamente son menos brillantes. Hay estrellas con mayor proporción de elementos pesados que là del Sol y otras que parecen compuestas principalmente de hidrógeno.

⩽ Puesto que el Sol es típico en tantas de sus características, cabe esperar que su edad también sea típica. ¿Cómo puede determinarse la edad del Sol? Si pudieramos saber por qué el Sol radia al espacio energía en tan grandiosa proporción, podríamos estimar su provisión total de combustible, lo cual nos daría una idea aproximada de su antigüedad y tiempo de vida que le queda. Esto nos lleva a otra cuestión fundamental. ¿Por qué brilla el Sol?

⩽ La combustión es una fuente corriente de energía. Si una sustancia como el carbón, compuesta principalmente del elemento carbono, se calienta en presencia del oxígeno de la atmósfera, tiene lugar una reacción química

2. N. del T. Del latín constellationem – cum stellum – unión de estrellas, estrellas juntas.

en la que se produce el gas dióxido de carbono CO_2 a partir del C y del O_2. A elevadas temperaturas, es tal la afinidad entre el carbono y el oxígeno, del uno por el otro, que la reacción transcurre en forma violenta, generando mucho más calor que el existente al iniciarse la reacción. Esta energía que se desprende se manifiesta como fuego. Hagamos la hipótesis, sencilla pero instructiva, de que el Sol brilla porque está ardiendo y supongamos que su composición es la mitad carbón y la otra mitad oxígeno, prescindiendo, de momento, de la prueba espectroscópica de que está compuesto principalmente de hidrógeno y de que apenas tiene carbono y oxígeno. La formación de un gramo de dióxido de carbono por la reacción $C + O_2 \rightarrow CO_2$ produce unos $3,4 \times 10^{11}$ erg. Por tanto, si estuviera ardiendo el total de 2×10^{33} gramos del Sol, se desprenderían $3,4 \times 10^{11}$ erg $g^{-1} \times 2 \times 10^{33}$ g = $6,8 \times 10^{44}$ erg. El Sol radía al espacio 4×10^{33} erg s^{-1}. Este es el valor de la luminosidad solar. En consecuencia, con nuestra hipotética fuente de combustión energética, el Sol podría estar radiando al espacio, a su luminosidad actual $(6,8 \times 10^{44}$ erg$)/(4 \times 10^{33}$ erg $s^{-1}) = 1,7 \times 10^{11}$ s. Como en un año hay (aproximadamente) $3,16 \times 10^7$ segundos, resulta que la vida de nuestro Sol en llamas parece ser de unos 5400 años. Si tuviera más años, ya se habría extinguido.

≪ Nuestra conclusión está bastante de acuerdo con la edad de la Tierra determinada por el arzobispo Ussher (3), el cual en el siglo XVII calculó las vidas de varios personajes bíblicos, hizo las oportunas interpolaciones y extrapolaciones y llegó a la conclusión de que hacía unos 6000 años que se había formado la Tierra. Nosotros suponemos que el Sol está ardiendo y deducimos que su vida es de unos 5400 años. Esto es un ejemplo interesante de los peligros de la ciencia. Los métodos son distintos, pero las conclusiones son, más o menos, las mismas. (Es muy posible que el Sol y la Tierra tengan la misma antigüedad.) Algunos podrían caer en la tentación de llegar a la conclusión de que la cronología bíblica y que la hipótesis de un Sol de carbón ardiendo se confirman mutuamente y que es inminente la muerte apocalíptica del Sol. Sin embargo, hay otros factores que no concuerdan con esas dos hipótesis.

≪ Por ejemplo, los geólogos encuentran que la Tierra está cubierta de rocas sedimentarias formadas por deposición en el fondo de las aguas. A la tasa actual de sedimentación, harían falta diez millones de años para llegar a la cantidad observada. Los paleontólogos encuentran esas capas sedimentarias llenas de fósiles de organismos, ahora extinguidos, que en otra época estuvieron distribuidos por todo el mundo y que hacen falta decenas o centenas de millones de años para explicar el origen evolutivo de esas criaturas a su ritmo actual de evolución. La cantidad de sal en los océanos procede de la erosión aluvial y por su abundancia actual, al ritmo también actual de erosión, se puede colegir que han pasado al menos cien millones de años para acumularse.

3. N. del T. Teólogo irlandés, arzobispo protestante de Armagh y primado de Irlanda (1581-1656)

≪ Estas clases de argumentación eran corrientes en lo que se escribía sobre las edades del Sol y de la Tierra a finales del siglo pasado. Desde entonces, el descubrimiento de la radiactividad ha sentado sobre base firme todo el tema de la cronología de la Tierra. Los isótopos de algunos elementos, como el uranio, emiten de forma espontánea e impredecible partículas cargadas que proceden de sus núcleos y entonces pesan menos; se transmutan a otro átomo diferente de menos peso atómico. Cuando un isótopo de uranio completa su ciclo de radiactividad, se desintegra y convierte en un isótopo particular del plomo, que es estable y no se desintegra más. Se puede determinar el tiempo característico para que, por ejemplo, la mitad de un fragmento dado de uranio se convierta en plomo. Dicho tiempo es independiente de la temperatura local, de la presión y de las demás condiciones; por tanto, midiendo las cantidades de uranio e isótopos de plomo de una muestra de roca determinada, se puede deducir el tiempo transcurrido desde que se formó esa roca, así como su composición química original. De esta forma se ha podido llegar a la conclusión de que la Tierra ha necesitado unos $4,5 \times 10^9$ años para llegar a su estado actual. Los análisis de meteoritos -pequeños trozos de piedra y hierro desprendidos del cinturón de asteroides- muestran que se formaron en la misma época que la Tierra. Como no parece probable que la Tierra o los asteroides se formaran mucho antes que el Sol, podemos concluir que la antigüedad del Sol es, al menos, de $4,5 \times 10^9$ años y, ya que el Sol es una estrella corriente, las edades características de muchas estrellas deben ser de varios miles de millones de años.

≪ ¿Pero, cuál es la fuente de energía que hace brillar al Sol? Hemos visto que la combustión es, con mucho, demasiado débil. A principios de siglo se propusieron otras explicaciones. Algunos creían que la energía solar la suministraban las colisiones de muchos meteoros contra el Sol; otros, suponían que el Sol se estaba contrayendo lentamente y que el paulatino incremento diferencial de su densidad en el interior era la causa de la luminosidad observada. Sin embargo, las vidas calculadas con estas suposiciones resultaban cientos de veces menores. Es claro que existió alguna otra fuente de energía, pero su naturaleza apenas puede vislumbrarse. En 1926, el astrofísico británico Sir Arthur Stanley Eddington se hizo la siguiente reflexión: "¿Fluye la energía libremente de la materia a 40000000° como sale el vapor del agua a 100°?"

≪ Es curioso que el mismo descubrimiento de la radiactividad que condujo a la determinación exacta de la edad de la Tierra, llevó también a la comprensión de la luminosidad solar. A partir de la masa y composición del Sol, es posible calcular la presión en su interior, ya que dicha presión se determina por el peso de la materia que lo cubre. Se ha hallado que la temperatura de los gases cerca del centro del Sol es de diez millones de grados o superior. Los avances realizados en física nuclear en la década de 1930 demostró que a tales temperaturas, los átomos colisionan entre sí con tal vigor,

que se liberan enormes cantidades de energía de forma análoga, en sentido atómico, a como se desprende el calor durante la combustión molecular del carbono. La pregunta de Eddington quedó contestada afirmativamente. Puesto que el Sol está compuesto principalmente de hidrógeno, las reacciones termonucleares que tienen lugar en su interior implican la fusión de cuatro núcleos de hidrógeno –o protones– y la formación de uno de helio. La velocidad de estas reacciones depende mucho de la temperatura. La energía que se libera emerge lentamente del interior del Sol y, finalmente y cerca de la superficie, se transforma en radiación que es emitida al espacio. Esta es la única fuente de la fuerza actual del Sol.

≮ La energía liberada es de unos 6×10^{18} erg por cada gramo de hidrógeno que se convierte en helio. El proceso es pues como diez millones de veces más eficaz que la combustión del carbón. Es aproximadamente el mismo coeficiente de incremento de eficacia –si es que ésta es la palabra– que el de las bombas termonucleares sobre los explosivos ordinarios tales como el TNT. Un ingenio nuclear que pese como una tonelada puede producir una energía explosiva de diez megatones, es decir, equivalente a la de diez millones de toneladas de TNT.

Esta nomenclatura común de la potencia explosiva de las armas nucleares asigna a los procesos termonucleares un valor 10^7 mayor que a los procesos químicos.

≮ Ese coeficiente de 10^7 es el mismo que hallamos para la edad del Sol si le aplicamos las fuentes de energía termonuclear en vez de las químicas. En lugar de 5×10^3 años para su duración, obtenemos $5 \times 10^3 \times 10^7 = 5 \times 10^{10}$ años, o sea, con holgura, unas diez veces la edad de la Tierra. Así pues, si el Sol consumiera toda su reserva nuclear de hidrógeno, podría seguir brillando con su luminosidad actual otros 45 mil millones de años, más o menos ($5 \times 10^{10} - 5 \times 10^9 = 4{,}5 \times 10^{10}$). Sin embargo, existe un límite a la cantidad de hidrógeno que el Sol puede convertir en helio antes de que tengan lugar otros procesos. Los últimos cálculos estiman que puede esperarse que siga brillando con su luminosidad actual, en la serie principal, durante otros 8 mil millones de años. Lo que suceda después de eso y las consecuencias resultantes para la Tierra, lo veremos inmediatamente.

≮ Hubo un tiempo en el que se creyó que todas las estrellas del cielo se habían formado hacia una misma época, de hace miles de millones de años, pero, tenemos hoy una serie de conocimientos fidedignos que indican que se están formando continuamente por condensación del polvo y gas interestelar. Incluso hoy día, los procesos misteriosos de los orígenes estelares están ocurriendo en regiones de la Galaxia que nos son difíciles de obervar y que por mecánica sólo comprendemos en parte.

≮ El problema de la evolución estelar se puede concadenar a los procesos del desarrollo humano. Consideremos, a tenor de la última materia que trata este libro, que somos unos seres racionales extraterrestres –probablemente no marcianos– que llegamos a la Tierra por primera vez. Lo más probable es que rápidamente pasaríamos por alto otras criaturas vivientes, desde los virus a las ballenas y centraríamos nuestra atención en los seres humanos, como la forma de vida más importante del planeta. Examinando una muestra aleatoria de seres humanos, observaríamos dos sexos, una gama de colores un tanto amplia, varios rasgos fisonómicos característicos y un continuo de estaturas, desde unos 50 cm hasta unos 200 cm. Los de 50 cm serían muy escasos, habría una distribución normal de estaturas, con la frecuencia máxima alrededor de los 170 cm. De vez en cuando nos encontraríamos con locales –digamos, centros escolares– en los que la concentración de seres humanos sería de unos 120 cm. Se nos presentaría el problema de explicar el origen de los seres humanos. ¿Es inmutable cada estatura, sexo y color? ¿Se hacen más grandes los pequeños? ¿Se convierten en pequeños los grandes? ¿Ocurren cambios de sexo y color? y ¿son raros o frecuentes? Si estuviéramos en la Tierra solamente un período mucho más corto que el de la escala de tiempo propia del desarrollo humano –digamos una estancia de una semana– cualquier conclusión respecto al crecimiento humano sería ilativa, pero no observada directamente. Tendríamos también que eliminar los efectos de la selección observativa, porque los seres humanos recién formados serían los más difíciles de observar. E incluso si hubiéramos formulado la hipótesis correcta sobre el desarrollo humano, podrían continuar oscuros los métodos de origen de los distintos seres humanos; en realidad, la explicación correcta podría parecer con fundamentos poco profundos, muy poco probables. Pues bien, nuestro conocimiento del ciclo de la vida de las estrellas es algo parecido.

≮ Llevamos observando con detalle las estrellas solamente unos pocos cientos de años. Hemos visto que la duración de una estrella como el Sol es alrededor de 10^{10} años. Por tanto, sólo hemos observado de las estrellas clásicas un 10^{-8} del ciclo de su vida. El caso comparable en la observación de seres humanos (vidas características de 60 años) sería un período de $60 \times 10^{-8} = 6 \times 10^{-7}$ años $= 6 \times 10^{-7}$ años $\times 3 \times 10^7$ segundos año^{-1} $= 18$ segundos. Indudablemente, el extraterrestre que en 18 segundos de observación pudiera averiguar el ciclo de vida humano, tendría una inteligencia extraordinaria. Es por tanto digno de mención el nivel de conocimientos que tenemos sobre la evolución estelar.

≮ Sabemos que todas las estrellas, como todas las personas, no tienen la misma edad y que, a medida que transcurre el ciclo de vida de una cualquiera de ellas, adopta las características de muchas otras que son diferentes superficialmente. Algunas son objetos relativamente jóvenes; otras, son mucho más viejas que el Sol. Las jóvenes suelen ser las más brillantes. Las estrellas con luminosidades intrínsecamente grandes, queman su combustible nuclear muy deprisa y, en consecuencia, son de vida corta. ≯

Los grupos de estrellas jóvenes están concentrados en los brazos espirales de la Galaxia; son aquellos tubos retorcidos de fuerza magnética que contienen la mayor parte del gas interestelar de la Vía Láctea. Recordemos que las intensidades del campo magnético galáctico son muy débiles; que no pasan de 10^{-5} gauss. Por tanto, las fuerzas magnéticas no serán lo suficientemente

fuertes como para afectar a los movimientos de objetos tan densos y masivos como son las estrellas. Así pues, concluimos que las estrellas jóvenes se encuentran solamente dentro de los brazos espirales y no porque el campo magnético galáctico las mantenga allí, sino simplemente porque están recién formadas por el gas interestelar que allí se concentra. Las estrellas más viejas se hallan en gran número en el núcleo galáctico y en el halo, donde la densidad del gas es muy baja. Algunas de estas estrellas viejas han viajado desde sus lugares de nacimiento, en la escala del tiempo, tanto como 10^8 ó 10^9 años. Así pues, la distribución de las estrellas viejas y jóvenes en la Galaxia es un argumento importante para sustentar la idea de que las estrellas se forman a partir del medio interestelar.

≪ Consideremos ahora la evolución de las estrellas. Puesto que no se conocen todavía los primeros estadios de la evolución estelar, nos interesaremos por el cuadro teórico corriente de la evolución de las masas de gas interestelar. Se postula que, bajo ciertas condiciones determinadas, empieza a condensarse una nube de gas interestelar y polvo. Quizá tenga esto lugar por fuerzas gravitatorias que atraigan a cada partícula de la nube hacia las demás. La nube puede fragmentarse en otras más pequeñas; éstas a su vez, en otras todavía más pequeñas, hasta llegar con el tiempo a formar nubes con masas aproximadamente estelares. Nos las podemos imaginar como esferas de gas relativamente densas y opacas. ≫

En sentido estricto, esa esfera no es todavía una estrella porque las temperaturas en sus regiones centrales no son lo suficientemente elevadas para que tengan lugar las reacciones termonucleares. A esas bajas temperaturas, las presiones del gas en el interior de la esfera no son lo bastante grandes para vencer a las fuerzas de atracción gravitatoria entre los distintos granos y átomos y, por ello, la esfera prosigue la contracción. Se cree que las protoestrellas en este estado opaco, distendido, se pueden ver en las nebulosas gaseosas como manchas pequeñas y oscuras llamadas glóbulos. (Veánse las figuras 6-1 y 6-2.) Hay razones para creer que las protoestrellas se forman colectivamente y, a continuación, los grupos evolucionan y pasan a formar asociaciones estelares o cúmulos. Es muy probable que durante esta primera fase de evolución se formen alrededor de las estrellas agregados de masas menores y que éstos, gradualmente, se conviertan en planetas. (Véanse los capítulos 11-13.)

Cuando una protoestrella se contrae, su energía potencial gravitatoria se convierte en calor y luz. Hace falta una cantidad tremenda de energía para calentar una masa estelar desde temperaturas próximas al cero absoluto hasta decenas de millones de grados. El resto de la energía potencial liberada durante la contracción se libera al espacio circundante. Como las dimensiones de la esfera de gas que se contrae son muy grandes, la cantidad de energía radiada al espacio por unidad de superficie – digamos, por centímetro cuadrado– será muy pequeña. La ecuación de Stefan - Boltzmann, de física, demuestra que la cantidad de energía radiada por unidad de superficie es proporcional a la cuarta potencia de la temperatura. Así, si la temperatura

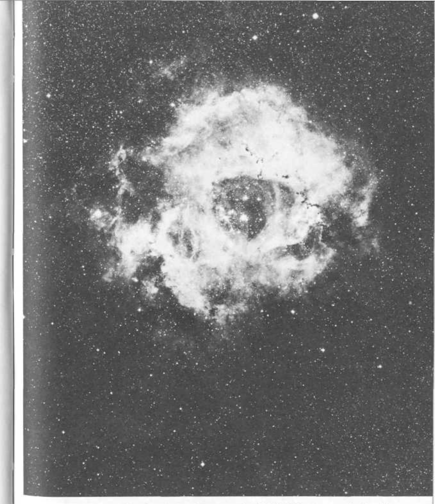


Figura 6-1. La nebulosa de gas y polvo NGC 2237 en la constelación del Unicornio. Las manchas oscuras se cree que son grandes concentraciones de polvo absorbente. Los pequeños glóbulos negros podrían ser estrellas frías en sus principios de formación. (Cortesía de los Observatorios de Monte Wilson y Monte Palomar.)



Figura 6-2. Fragmento ampliado de la nebulosa NGC 2237 en el que se distinguen mejor las nubes absorbentes y los glóbulos. (Cortesía de los Observatorios de Monte Wilson y Monte Palomar.)

se duplica, la radiación por unidad de superficie se incrementa $2^4 = 16$ veces. Las capas superficiales de tales protoestrellas, pueden, por tanto, estar relativamente frías y la luminosidad, en cambio, ser casi la misma que la de estrellas más viejas en estado de evolución de masa semejante, viniendo compensadas las temperaturas menores por una mayor superficie. Dichas protoestrellas, con bajas temperaturas, pero no forzosamente de poca luminosidad, se sitúan por tanto a la derecha de la serie principal en el diagrama de espectro - luminosidad o de Harztsprung-Russell descrito en el capítulo 4. Es decir, quedan en la región de las gigantes rojas o de las enanas rojas, según sea la masa que tengan.

A medida que transcurre el tiempo, la protoestrella continúa contrayéndose; se reducen sus dimensiones y aumenta su temperatura interior y exterior. ⩽ Esta primerísima fase de contracción de la protoestrella tiene lugar relativamente deprisa, en la escala de tiempo cósmico. El tiempo de contracción depende solamente de la densidad inicial de la nube de gas. Si originalmente tuviera ésta una densidad de 10^4 átomos por centímetro cúbico; el tiempo para el colapso gravitacional sería, aproximadamente, de 5×10^5 años. Si la densidad inicial fuera mayor, el tiempo para el colapso sería menor, porque las fuerzas de atracción gravitatorias que lo producen son más efectivas cuando aumenta la densidad. En ese momento, las temperaturas interiores de la protoestrella alcanzan los 100000 K y como ésta no es suficiente para iniciar los procesos termonucleares, no se forma todavía la estrella. Sin embargo, sí lo es para ionizar el hidrógeno y el helio, que son los constituyentes predominantes de la futura estrella. Es decir, las temperaturas se elevan lo bastante para despojar de electrones a los átomos de hidrógeno y helio por violentas colisiones.

Estos átomos ionizados absorben mucho mejor la radiación generada en el interior de la protoestrella que los neutros con sus cargas completas de electrones. A su vez, el aumento de la opacidad, aumenta las temperaturas internas y la radiación que antes se escapaba al espacio, queda ahora retenida en el interior aportando más calor. En ese estado de temperatura crítica, los átomos y iones en el interior de la estrella se mueven con suficiente velocidad para ejercer una presión ascendente que equilibra aproximadamente el peso del material que gravita sobre ellos y hace que disminuya la velocidad de contracción.

⩽ La estrella pasa ahora a un estado de convección en el cual se establece un intercambio de materia entre el interior y el exterior. Durante la fase del colapso se produce un aumento de luminosidad, que ahora comienza a disminuir y se aproxima a la serie principal, como indica la figura 6-3, que es un diagrama de temperatura - luminosidad como el que se describió en el capítulo 4. La línea continua inclinada representa la serie principal.

⩽ El eje de ordenadas corresponde a la luminosidad, en unidades de luminosidad solar $L_☉$. Por ejemplo, $L/L_☉ = 10$, quiere decir una luminosidad dies veces mayor que la del Sol. El eje de abscisas corresponde a la temperatura de las capas exteriores de la estrella, que son las que radian directamente al

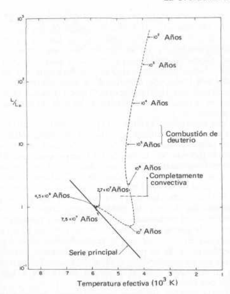


Figura 6-3. Esquema teórico de la trayectoria evolutiva de una estrella de masa solar en su viaje hacia la serie principal. La trayectoria evolutiva se muestra como línea a trazos empezando con luminosidades muy intensas que descienden hacia la recta inclinada que representa la serie principal. El punto marcado $4{,}5 \times 10^9$ años representa la posición actual del Sol. (Cortesía del Dr. A. G. W. Cameron y del Dr. G. Ezer, del Instituto para Estudios Espaciales, Nueva York.)

espacio, expresadas en miles de grados Kelvin. La posición actual del Sol está situada en el punto $L/L_{\odot} = 1$ y temperatura = 6000 K, aproximadamente. Vemos que la fase de contracción de la evolución inicial de una estrella de masa solar comienza con una luminosidad muy alta de $L/L_{\odot}$ un poco menos que 1000. No obstante, vemos que va declinando rápidamente en luminosidad y en unos pocos millones de años tiene aproximadamente la actual del Sol. En algo así como 100 millones de años recorre el espacio marcado por la línea a trazos y entra en la serie principal. ≫ La temperatura en su interior llega entonces a ser suficiente para que comiencen las reacciones termonucleares; la presión del gas en las regiones del interior equilibra a las fuerzas de atracción gravitato-

ria y la esfera gaseosa interrumpe la contracción, pasando la protoestrella a ser una estrella de verdad.

En realidad, podemos estar observando estrellas en la fase de contracción vertical hacia la serie principal. Una especie llamada estrellas T Tauri, se halla enclavada en nebulosas oscuras. ≪ Su luminosidad cambia con el tiempo, a veces, erráticamente. Existen ciertas pruebas de que están perdiendo masa y se encuentran en la parte apropiada del diagrama de temperatura - luminosidad. ≫

Después que la estrella termina su fase de contracción y entra en la serie principal, su posición en el diagrama de temperatura - luminosidad varía muy poco a lo largo de grandes períodos de tiempo. ≪ Por ejemplo, en los últimos 5×10^9 años, nuestro Sol se ha trasladado hacia arriba y a la izquierda por la serie principal, una cantidad muy pequeña (correspondiente a un incremento en luminosidad de media magnitud, o como un 20%). ≫ En la serie principal se mantiene la radiación por las reacciones termonucleares del interior y por la consiguiente conversión de hidrógeno en helio. Así pues, la serie principal representa no un trayecto de evolución, sino el lugar geométrico de los puntos del diagrama de Hertzsprung-Russell en los cuales radian de forma estable durante largos períodos de tiempo estrellas de distintas masas, debido a las reacciones termonucleares de sus interiores respectivos.

No todas las estrellas de igual masa ocupan la misma posición en el diagrama de Hertzsprung-Russell debido a las diferencias en sus composiciones químicas. Si una protoestrella tiene una masa relativamente pequeña de elementos pesados, llega a estrella en la serie principal ocupando una posición inferior a la que le correspondería si los contuviera en mayor cantidad. Ya hemos mencionado este resultado teórico que explica la serie de subenanas que tienen un contenido de elementos pesados unas diez veces menor que el de las estrellas de la serie principal y que están por debajo de ésta, que es la que corresponde a la mayoría de las estrellas.

La masa inicial de un estrella determina su duración en la serie principal. Si la masa es grande, las temperaturas interiores también son grandes y la estrella se convierte en una fuente de radiación muy poderosa, a consecuencia de lo cual agota rápidamente su provisión de combustible de hidrógeno. Así, por ejemplo, las estrellas de la serie principal con masas 20 ó 30 veces mayores que la del Sol –las gigantes azules calientes de la clase espectral O– sólo permanecen en la serie principal unos pocos millones de años. Por otra parte, las que tienen masas parecidas a la del Sol, residen durante 10 ó 15 mil millones de años. En la tabla II vemos un cálculo estimado de las vidas de las estrellas de la serie principal, de distintas clases espectrales. Los valores de las masas, radios y luminosidades de estas estrellas, también vienen indicados en unidades solares. Una masa de 10 significa que es diez veces la del Sol, o sea $10 \times 2 \times 10^{33}$ g = 2×10^{34} gramos, y así sucesivamente.

De acuerdo con las estimaciones actuales, la Galaxia tiene de 10 a 20 mil millones de años. En la tabla II vemos que el período de tiempo calcula-

Tabla II. Propiedades de las estrellas de la serie principal

Tipo de espectro estelar	*Masa en unidades de la del Sol*	*Radio en unidades de radio solar*	*Luminosidad en unidades de la del Sol*	*Tiempo en años de permanencia en la serie principal*
B0	17,0	9,0	30 000	8×10^6
B5	6,3	4,2	1 000	8×10^7
A0	3,2	2,8	100	4×10^8
A5	1,9	1,5	12	2×10^9
F0	1,5	1,25	4,8	4×10^9
F5	1,3	1,24	2,7	6×10^9
G0	1,02	1,02	1,2	$1{,}1 \times 10^{10}$
G2 (el Sol)	1,00	1,00	1,0	$1{,}3 \times 10^{10}$
G5	0,91	0,92	0,72	$1{,}7 \times 10^{10}$
K0	0,74	0,74	0,35	$2{,}8 \times 10^{10}$
K5	0,54	0,54	0,10	$7{,}0 \times 10^{10}$

do que pasan en la serie principal las estrellas después de las KO es mucho mayor que la edad de la Galaxia. Por tanto, podemos concluir que ninguna de estas estrellas ha salido de la serie principal.

La combustión del hidrógeno – su conversión en helio por reacciones termonucleares – ocurre en las profundidades estelares, porque tanto las altas temperaturas requeridas para iniciar esas reacciones, como la convección necesaria para suministrar nuevo hidrógeno para las futuras reacciones, sólo se encuentran en esa región. Puesto que la cantidad de hidrógeno en el núcleo es finita, tarde o temprano (dependiendo de la masa de la estrella) acabará agotándose. No todo el hidrógeno de la estrella está disponible para las reacciones nucleares y, con el tiempo, las estrellas quedan con un núcleo caliente, compuesto casi por completo del producto de la reacción termonuclear, es decir, de helio.

¿Qué le sucede a una estrella cuando su núcleo ha agotado todo o casi todo el hidrógeno? La generación de energía nuclear en las regiones centrales tiene que cesar. En esas circunstancias, las temperaturas y las presiones no serán suficientes para oponerse a las fuerzas gravitatorias que originalmente la contraían. El núcleo empezará entonces a contraerse, mientras que, ≪ a causa de las elevadas temperaturas del interior ≫ -, las capas exteriores a expansionarse; empezarán a continuación a aumentar las temperaturas del interior y a descender las del exterior. ≪ El aumento de la superficie compensará de sobras la disminución de su temperatura y cuando se haya agotado el hidrógeno del núcleo, volverá a aumentar la luminosidad de la estrella. Si ésta aumenta en luminosidad y disminuye en temperatura, tiene que trasladarse hacia arriba y a la izquierda de la serie principal en el diagrama de Hertzsprung-Russell. La estrella se ha convertido ahora en gigante roja. ≫

Mientras tanto, allá en el interior, se forma una región caliente, muy densa, dentro del núcleo, formada por helio y pequeñas cantidades de elementos más pesados. En esa región ya no tienen lugar reacciones nucleares porque carecen de hidrógeno. Tales reacciones se *producirán* en una capa relativamente delgada en la periferia del núcleo. Cuando la estrella se convierte en gigante roja, su luminosidad se mantiene por una fina capa de hidrógeno "ardiendo" que separa el núcleo, rico en helio, de la envolvente, rica en hidrógeno. Si el contenido de elementos pesados es pequeño, la roja gigante tendrá mayor luminosidad.

≪ La figura 6-4 presenta un diagrama de temperatura - luminosidad que da las trayectorias evolutivas, calculadas teóricamente, de estrellas de masas distintas. No es tan complicada como parece a primera vista. El eje de ordenadas en el logaritmo de la luminosidad estelar, en unidades solares, es decir, O indica una luminosidad de $10^0 = 1$ veces la del Sol o sea la del mismo; 2 denota $10^2 = 100$ veces la luminosidad solar; -2 es 10^{-2}, o sea 1/100 y así sucesivamente. El eje de abscisas da el logaritmo de la temperatura superficial efectiva; por tanto, un valor de 3,0 significa una temperatura de $10^3 = 1000$ grados; 4,0 una de $10^4 = 10000$ grados, etc. Están indicadas las trayectorias evolutivas, en la serie principal, de las estrellas que tienen 0,7, 4 y 15,6 masas solares, respectivamente. Esas estrellas se salen de la serie principal en las posiciones marcadas por H, es decir, que están quemando hidrógeno en una fuente de capa. Vemos que una estrella de 0,7 masas solares sale de la serie principal casi verticalmente, mientras que las mayores lo hacen más horizontalmente. Como consecuencia, las trayectorias evolutivas tienden a "concentrar" las estrellas en la misma región del diagrama de las gigantes rojas. ≫ La siguiente historia evolutiva de esas rojas gigantes, como indica el diagrama, se verá a continuación.

Es importante comparar los diagramas de espectro-luminosidad observados para los distintos cúmulos estelares con los resultados de los cálculos, como los que se presentan en la figura 6-4. Se escogen los cúmulos estelares – el de las Pléyades, por ejemplo – porque podemos suponer que en tales agregaciones todas las estrellas son de la misma época. ≪ Si no se hubieran formado más o menos al mismo tiempo, resultaría fifícil comprender su asociación material. Los miembros más rápidos de tales asociaciones estelares se escaparían; el cúmulo tiende también a ser disgregado por perturbaciones gravitatorias externas. ≫ Por comparación de diagramas de espectros - luminosidad de cúmulos antiguos con los de modernos, es posible confirmar los cálculos teóricos de la evolución estelar e incluso deducir las edades de los distintos cúmulos estelares. En las figuras 6-5 y 6-6 vemos diagramas de espectro - luminosidad para dos cúmulos estelares diferentes. El eje de abscisas es en función del índice de color (B-V), que es una magnitud muy relacionada con el tipo de espectro y temperatura de la estrella y que se define al comienzo del capítulo 4. En la figura 6-5 cada punto representa el

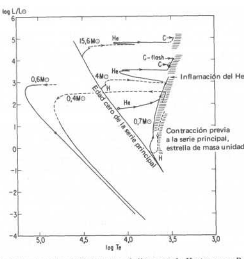


Figura 6-4. Trayectorias evolutivas en el diagrama de Hertzsprung-Russell, calculadas teóricamente para estrellas de distintas masas, según la obra *Progress of Theoretical Physics*, supl. 22, de C. Hayashi, R. Hoshi y D. Sugimoto, Kyoto (1962).

índice de color y luminosidad de una estrella particular del cúmulo estelar galáctico NGC 2254 (≪ NGC es la abreviatura de New General Catalogue, colección que no hace grandes distinciones entre galaxias, nebulosas gaseosas y cúmulos estelares. Era *nuevo* cuando apareció por vez primera en 1888, pero ahora el nombre resulta poco apropiado al haberse hecho viejo con el paso de los años. ≫) El diagrama para NGC 2254 muestra una concentración densa de estrellas masivas, calientes, situadas en la parte superior izquierda de la serie principal. (El índice de color 0,2 corresponde a una temperatura superficial de 20000 K, es decir, a un espectro del tipo B.) ≪ La presencia de esas estrellas calientes nos dice inmediatamente que NGC 2254 es una formación relativamente joven. ≫

El cúmulo globular M3 es un objeto antiguo. (≪ Se llama M3 según otro catálogo totalmente aparte y parcialmente solapado, recopilado por el

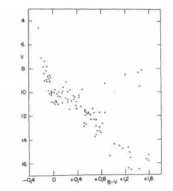


Figura 6-5. Diagrama de Hertzsprung-Russell del muy joven cúmulo estelar galáctico NGC 2254, reproducido con autorización de M. Walker, del *Astrophysical Journal*, supl. 23 (1956).

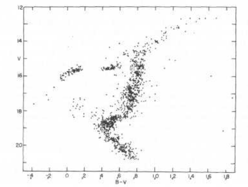


Figura 6-6. Diagrama de Hertzsprung-Russell del muy evolucionado cúmulo globular M3, reproducido con autorización de H. L. Johnson y A. R. Sandage, del *Astrophysical Journal*, 124, 379 (1956).

astrónomo francés llamado Messier (4) . ≫) El diagrama de M3 casi no contiene estrellas en el tramo superior izquierdo de la serie principal; por otra parte, la rama de las gigantes rojas que se extiende a la derecha de dicha serie está muy poblada. Observamos que en el diagrama de NGC 2254 hay muy pocas gigantes rojas. Concluimos pues, que los cúmulos antiguos, como el M3, tienen gran número de estrellas que ya se han salido de la serie principal, mientras que las jóvenes, tales como NGC 2254 sólo contienen unas pocas que hayan evolucionado hasta ese extremo.

En la figura 6-6 para M3, vemos un ramal casi horizontal de estrellas que descienden con muy poca pendiente de la parte alta derecha hacia el centro por la izquierda, mientras que en la figura 6-5 de NGC 2254 no se observa la rama análoga. ¿Es posible que las estrellas en estado de evolución muy avanzado recorran esa rama casi horizontal? Cuando las temperaturas de los núcleos de helio en estado de concentración, densos, de las rojas gigantes alcanzan temperaturas de 1,0 a 1,5 × 10^8 K se establece una nueva clase de reacción termonuclear. A esas temperaturas, se fusionan los núcleos de helio y forman núcleos de carbono, desprendiéndose más radiación. Tan pronto como comienza esta combustión del helio cesa la contracción del núcleo, aumenta la temperatura de las capas superficiales y la estrella se muda hacia la izquierda en el diagrama de espectro-luminosidad. ≪ Esta característica se puede observar en las trayectorias evolutivas teóricas (figura 6-4) para, por ejemplo, una estrella de 4 masas solares. Por cálculos laboriosos aparecen trayectorias aún más complicadas y una estrella simple puede atravesar secciones de la rama horizontal muchas veces durante su vida. El comienzo repentino de la combustión del helio se conoce como "inflamación del helio". En la figura 6-4 puede verse cómo las estrellas de 0,7 masas solares invierten rápidamente hacia arriba su movimiento en el diagrama de Hertzsprung-Russell después de la inflamación del helio.

≪ Cuando se ha consumido mucho helio del núcleo, el caso es algo parecido al que tiene lugar cuando se agota el hidrógeno. Sólo tenemos carbono ardiendo cerca del núcleo y una fuente en capa de helio ardiendo alrededor del núcleo de carbono de la estrella. En la de 4 masas solares de la figura 6-4, el inicio de la combustión del carbono sucede muy rápidamente y se describe como "inflamación del carbono". Los productos principales de la combustión del carbono son oxígeno, neón y magnesio. En general, podemos ver que hay una sucesión continua de contracciones del núcleo, aumentos de temperatura y síntesis de elementos más masivos en el interior estelar a medida que la estrella avanza por su complicada trayectoria en la rama horizontal del diagrama de Hertzsprung-Russell.

≪ La figura 6-7 muestra el diagrama combinado de color-luminosidad para once cúmulos, uno de los cuales, el M3, es un cúmulo globular. Vemos

4. N. del T. El catálogo Messier se publicó en 1771 y contiene trescientos objetos galácticos o extragalácticos que se denominan precedidos de la letra M.

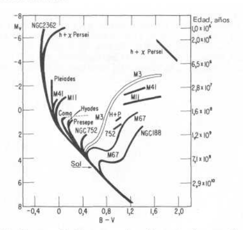


Figura 6-7. Diagrama de Hertzsprung-Russell combinado para diversos cúmulos estelares (según A. R. Sandage).

que la serie principal de los diferentes cúmulos se curva hacia arriba y hacia la derecha. El eje de abscisas, igual que antes, es el índice de color, que está relacionado con el espectro y temperatura de la estrella, aumentando esta última hacia la izquierda. El eje de ordenadas es la magnitud visual de la estrella, que es proporcional al logaritmo de la luminosidad estelar. Estas unidades son las mismas que las de los diagramas anteriores en los que se representaban distintas estrellas en vez de los cúmulos M3 y NGC 2254. La única diferencia entre las figuras es que en la 6-7 se emplea la magnitud visual por facilidad de comparación de los diferentes cúmulos. En las figuras 6-5 y 6-6 solamente se han expuesto las magnitudes visuales aparentes.

≪ Hemos visto que las estrellas más luminosas de la serie principal -las que están hacia la parte superior del diagrama de Hertzsprung-Russell – queman más deprisa su combustible nuclear y son, por tanto, las primeras estrellas de un cúmulo dado que se desvían hacia la derecha en el diagrama de espectro-luminosidad y se convierten en gigantes. Con el paso del tiempo, las estrellas de bastante más abajo, de la serie principal, se apartarán también e irán a parar a la región de las gigantes rojas. Por tanto, el simple examen del punto de desviación de la serie principal de cualquier cúmulo estelar dará una idea aproximada de su edad. Las edades de los cúmulos también se pueden representar en el eje vertical de la derecha de la figura 6-7. Vemos, por ejem-

plo, que el cúmulo h y χ Persei tiene unos pocos millones de años, mientras que el M3 tiene quizá 6 mil millones de años y que el galáctico M67 es aún más viejo. En la figura 6-8 se da el diagrama de Hertzsprung-Russell de M67 mostrando las distintas estrellas. Vemos en él que la desviación tiene lugar aproximadamente a una magnitud visual aparente de 12,5. La presencia de la rama gigante y de la rama horizontal atestigua su edad. El límite inferior de

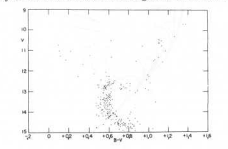


Figura 6-8. Diagrama de Hertzsprung-Russell para el muy antiguo cúmulo estelar galáctico M67, reproducido con autorización de H. L. Johnson y A. R. Sandage, del *Astrophysical Journal*, 121, *616* (1955).

la edad de la Galaxia viene fijado por la de su cúmulo más viejo, determinada a partir de su punto de desviación. Sin duda, la Galaxia tiene que ser más vieja que los cúmulos estelares que contiene. De esta forma se ha obtenido para su edad la cifra de 10 a 20 mil millones de años. Si pudieran resolverse las distintas estrellas de los cúmulos estelares o globulares de otras galaxias y medirse sus magnitudes, podríamos estimar las vidas de esas otras galaxias, pero, por desgracia, están demasiado alejadas para poder hacer tales mediciones. ≫

Este avance en el conocimiento de la constitución y evolución de las estrellas ha sido uno de los mayores logros de la astronomía en la segunda mitad de este siglo. No habría sido posible sin las investigaciones en el campo de la física nuclear que han llevado a la comprensión minuciosa de las reacciones nucleares que tienen lugar en las entrañas de las estrellas y de las rápidas calculadoras electrónicas.

Consideremos la evolución posterior de las estrellas tras su conversión en gigantes rojas. Las combustiones de hidrógeno, helio, carbono y similares del interior, no pueden continuar indefinidamente. ¿Qué sucede cuando se han agotado todas las fuentes de combustible nuclear?

Las observaciones directas y muchas consideraciones teóricas, sugieren que en la nueva fase del ciclo de vida de la estrella, se arroja de la misma una



Figura 6-9. La nebulosa planetaria NGC 7293 de la constelación de Acuario. Obsérvese las rayas finas que irradian de la estrella central y que sugieren que esta nebulosa planetaria se formó por una explosión de proporciones titánicas. (Cortesía de los Observatorios de Monte Wilson y Monte Palomar.)

fracción de masa significativa. Las capas exteriores se pueden desprender de la estrella y apartarse más y más de ella para formar una nebulosa planetaria, tal como la que aparece en la figura 6-9.

La intensa radiación ultravioleta de la estrella central, "núcleo" de la nebulosa planetaria, ionizará a los átomos neutros de la misma y los hará fluorescentes. Al cabo de algunas decenas de miles de años se disipará la nebulosa y sólo quedará la estrella central, pequeña, caliente y densa, que enfriándose gradualmente llegará con el tiempo a convertirse en enana blanca. Así pues, las enanas blancas se forman en el interior de las gigantes rojas y aparecen cuando se expulsan de éstas las capas externas.

≪ Se supone que, en algunos casos, puede formarse la capa envolvente estelar, no por la formación de una nebulosa planetaria, sino por la eyección gradual de masa. Se sabe de algunas gigantes rojas que van poco a poco lanzando materia al espacio. ≫

El que las enanas blancas, de inmensa densidad, son la etapa final de la evolución estelar, se ha corroborado por las observaciones directas. Los cúmulos estelares más viejos, como por ejemplo el de las Híades (5) y el de Praesepe (6), contienen muchas enanas blancas, mientras que los más jóvenes, como el de las Pléyades, por ejemplo, tienen pocas.

A medida que las enanas blancas se van enfriando gradualmente, cada vez radian menos hasta que pasan a ser enanas "negras" invisibles. Son estrellas frías, muertas, pero de enorme densidad, de millones de veces la densidad del agua. Sus dimensiones son menores que las de la Tierra; en cambio, sus masas, son comparables a la del Sol. El proceso de enfriamiento prosigue durante muchos miles de millones de años. ≪ En la parte inferior izquierda del diagrama de Hertzsprung-Russell de la figura 6-4 se pueden ver esas trayectorias evolutivas finales. Las estrellas se mudan hacia abajo, a la derecha, es decir, hacia temperaturas y luminosidades inferiores; la luz de la estrella es cada vez más tenue hasta que al final desaparece. Ha muerto la estrella. ≫

Tenemos que volver a insistir en que la velocidad de la evolución viene determinada por la composición y masa inicial de la estrella. Como nuestra Galaxia lleva existiendo aproximadamente de 10 a 20 mil millones de años, solamente aquellas estrellas cuyas masas excedan de cierto valor crítico habrán recorrido ya todas las fases de su evolución hacia las enanas negras. Esa masa crítica parece ser solamente un 10 a 20 por ciento mayor que la del Sol. ≪ O sea, que una estrella de 1,2 masas solares formada hace 10 mil millones de años puede ahora muy bien estar en la fase evolutiva de enana negra. ≫

Nuestro Sol se formó hace aproximadamente 5 mil millones de años. Se cree que en esta época la Galaxia tenía, en cuanto a características básicas, su forma actual. Durante 4,5 mil millones de años, por lo menos, nuestro Sol ha residido en la serie principal radiando energía de forma estable procedente de las reacciones termonucleares de su interior. ¿Cuánto tiempo continuará esa estabilidad? ≪ En la figura 6-10 puede verse la evolución del Sol. El eje de ordenadas corresponde a la luminosidad y al radio en función de sus valores actuales; el de abscisas a su edad en unidades de 10^{17} segundos. Recordemos que un año tiene unos 3×10^{17} segundos; luego 10^{17} segundos son, aproximadamente, 3×10^{9} años. Las dos curvas para el cambio de luminosidad y radio con el tiempo, se cortan, aproximadamente, a

5. N. del T. En la constelación Taurus. Su nombre procede, como muchos otros, de la mitología griega.

6. Corresponde a NGC 2632 ó M44 en el catálogo de Messier.

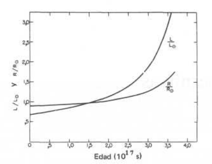


Figura 6-10. Cálculos teóricos de la variación de la luminosidad *L* y del radio *R* del Sol en función del tiempo. $L_\odot$ y $R_\odot$ significan los valores actuales. (Cortesía del Profesor Fred Hoyle de la Universidad de Cambridge.)

$1,5 \times 10^{17}$ segundos, o sea, a unos $4,5 \times 10^{9}$ años, que es más o menos la edad del Sol. Vemos que desde su origen hasta nuestros días ha disminuido un poco su luminosidad, mientras que su radio casi no ha crecido nada.

Con el transcurso del tiempo, la luminosidad del Sol empezará a aumentar con velocidad creciente; al cabo de otros 6 mil millones de años, cuando el Sol tenga $3,5 \times 10^{17}$ segundos, su luminosidad irá aumentando verdaderamente muy deprisa a la vez que el radio también empezará a aumentar. Estará entonces en el punto de conversión en gigante roja. Se han realizado distintos cálculos y todos dan resultados parecidos a los de la figura 6-10. ≫

Los más recientes indican que nuestro Sol se convertirá en gigante roja, aproximadamente, de aquí a 8 mil millones de años; en esa fase permanecerá varios cientos de millones de años y finalmente, por eyección de masa o explosión de nova el gigantesco Sol se descargará de su envolvente atmosférica y convertirá rápidamente en enana blanca.

≪ Un resultado de la evolución del Sol al pasar por su fase de gigante roja, es muy probable que sea la reducción de nuestra Tierra a un desierto de ascuas de carbón. El aumento de luminosidad del Sol hará que aumenten las temperaturas de la Tierra y demás planetas. Cuando ese Sol rojo, distendido, hinchado, aumente de tamaño, los océanos de la Tierra se consumirán por evaporación, las capas altas de la atmósfera se calentarán excesivamente y evaporarán perdiéndose en el espacio. Con el tiempo, el Sol penetrará en la órbita de Mercurio y en la de Venus y su superficie se acercará a la órbita de la Tierra. El si sobrevivirá alguna clase de vida hasta esa época remota y si la inteligencia terrestre podrá hacer frente a los retos supremos de entonces, son cuestiones dignas de reflexión. ≫

7

Supernovas

Si en el cielo brillaran miles de soles, constituirían el esplendor más poderoso.

Bhagavad Gita (1)

1.- N. del T. Tratado filosófico incluido en el Mahabharata. Es uno de los textos sagrados de la India.

En el capítulo anterior hemos hablado de la evolución de una estrella normal desde su origen como nube de gas y polvo que se condensa, hasta que llega a vieja como enana negra, fría y superdensa. Sin embargo, no todas las estrellas pasan por esas etapas de desarrollo normal. Algunas, en momentos determinados de su evolución, explotan, creando un espectáculo de pirotecnias cósmicas brillantes, denominado supernovas.

No existe cataclismo de ninguna estrella que sea más grande ni más magnífico que el de la supernova. Después de la explosión, la luminosidad estelar puede aumentar 100 millones de veces; durante breve tiempo una supernova puede radiar más luz que mil millones de estrellas. Se sabe de casos en los que el brillo de una supernova supera al de toda la galaxia a que pertenece.

≪ Los espectros de las supernovas demuestran que, en comparación con las estrellas ordinarias, contienen una cantidad relativamente pequeña de hidrógeno y gran cantidad de helio, hierro y otros elementos pesados. Puesto que la creencia es que las estrellas en sus últimas fases de evolución han convertido su hidrógeno en elementos más pesados, los espectros confirman la hipótesis de que las supernovas son una causa, más violenta que ninguna otra, de la muerte de una estrella. ≫

Las supernovas no se producen con frecuencia. En los sistemas estelares grandes, como la Vía Láctea, sólo se produce una explosión cada cien años, más o menos; en consecuencia, es mucho más probable que los astrónomos observen este fenómeno en otras galaxias. Si sistemáticamente se observan varios cientos de galaxias durante un año, es muy probable que, al menos, se descubra una supernova. Este sistema de observación es más efectivo que esperar a que aparezca una en nuestra Galaxia.

≪ En la figura 7-1 puede verse la aparición de una supernova en la galaxia espiral NGC 4725. La fotografía superior se tomó el 10 de mayo de 1940, cuando el brillo de aquella excedía al de las demás regiones de los brazos espirales, pero no al núcleo. La fotografía inferior se tomó el 2 de enero de 1941 y ya se había extinguido la supernova. La figura 7-2 muestra una variedad de supernova menos espectacular, pero más corriente; tuvo lugar en la galaxia más cercana M101; también aquí tenemos una serie de "antes" y "después" con la flecha indicando la supernova. ≫

A pesar de la poca frecuencia de las supernovas en la Vía Láctea, son muchas las registradas a lo largo de la historia. El 4 de julio (≪ ¡así dice! ≫) de 1054 apareció en el cielo una "estrella intrusa"; fue debidamente reseñada por los eruditos chinos. Era tan brillante que podía verse durante las horas





Figura 7-1. Arriba. Fotografía tomada el 10 de mayo de 1940 de la galaxia NGC 4725 en la constelación de Coma Berenices. El trazo recto indica la explosión de una supernova.
Abajo. La misma galaxia retratada el 2 de enero de 1941. Es patente el descenso en luminosidad de la supernova. (Cortesía de los Observatorios de Monte Wilson y Monte Palomar.)

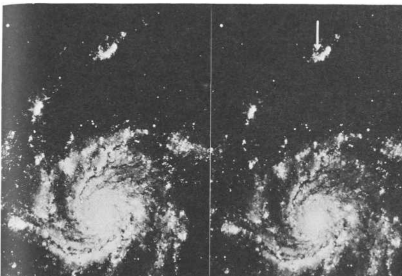


Figura 7-2. Dos fotografías de la galaxia tipo Sc NGC 5457 en la constelación de la Osa Mayor. Se observa la supernova en uno de los largos brazos espirales de esta galaxia, que se conoce también con el nombre de Messier 101. (Cortesía de los Observatorios de Monte Wilson y Monte Palomar.)

de luz. Superaba a Venus en luminosidad; únicamente el Sol y la Luna eran más brillantes. Fue visible a simple vista varios meses y luego fue apagándose paulatinamente.

Cuando Messier recopiló su catálogo de nebulosas, registró en primer lugar un objeto de forma rara, que debido a ello se llamó luego "Nebulosa del Cangrejo" o más corrientemente, el "Cangrejo". La figura 7-3 muestra una fotografía de la misma tomada con un filtro que sólo deja pasar la luz roja. Las observaciones sistemáticas indican que esta nebulosa se expande lentamente, como si fuera desenmarañándose en el cielo. El hecho real de que estando, como está, a más de 1000 parsecs de nosotros, podamos detectar ese aumento de sus dimensiones, quiere decir que su velocidad de



Figura 7-3. Fotografía de la Nebulosa del Cangrejo, Messier 1, en la constelación del Toro, tomada con luz roja. Esos gases turbulentos que se expanden son los restos de una supernova que explotó en nuestra Galaxia el año 1054 d. J. C. (Cortesía de los Observatorios de Monte Wilson y Monte Palomar.)

expansión ha de ser enorme. ≪ Puesto que podemos medir su razón aparente de expansión en unidades angulares y dado que conocemos la distancia a que se encuentra de nosotros, estamos en condiciones de calcular su velocidad verdadera de expansión, ≫ que se cifra próxima a los 1000 km/s, es decir, más de 100 veces la velocidad de un satélite artificial de la Tierra. En contraste, la velocidad del movimiento de las nebulosas gaseosas normales no supera los 20 a 30 km/s. Sólo una explosión titánica podría ser la causa de la expansión que se observa.

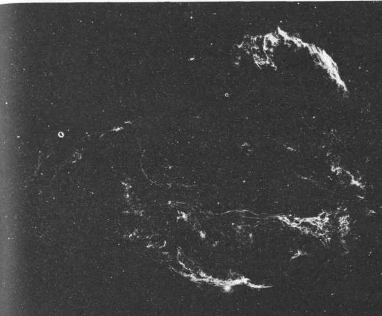


Figura 7-4. Nebulosa cirriforme en la Constelación del Cisne en la que se ve una región de intensa emisión radio. Fotografiada con luz roja. (Cortesía de los Observatorios de Monte Wilson y Monte Palomar.)

La nebulosa del Cangrejo está localizada en la región del cielo donde el año 1054 d.C. se observó aquella extraña estrella "intrusa". La velocidad de expansión indica que hace aproximadamente 900 años toda la nube estaba contenida dentro de un pequeño volumen. Se puede pues concluir que esta nebulosa es en realidad el resto del gigantesco cataclismo cósmico que se observó en China en la época de la dinastía de Sun Yat-sen.

En los últimos diez años la nebulosa del Cangrejo ha desempeñado un papel muy importante en astrofísica. Como el resto de una de las supernovas más cercanas, resulta más fácil de investigar que las demás. Los de



Figura 7-5. La Nebulosa Trífida, Messier 20, en la constelación de Sagitario. Es un ejemplo excelente de ensayo de proyección cósmica. El objeto de la derecha es un modelo de difracción de una estrella próxima. (Cortesía de los Observatorios de Monte Wilson y Monte Palomar.)

otras explosiones estelares semejantes que han fulgurado brevemente de vez en cuando en nuestra Galaxia están diseminados por todo el cielo. Todos, con pocas excepciones, son más antiguos que el Cangrejo. Las nubes de la figura 7-4, nebulosa cirriforme originada por supernova en la constelación del Cisne, se estima que tiene varias decenas de miles de años.

¿Cómo podemos distinguir las nubes de gas normales, nebulosas difusas como la M20 -la Trífida que se muestra en la figura 7-5- de una supernova? En 1949 se descubrió que la nebulosa del Cangrejo es una fuente muy poderosa de radiación radio. ≪ Existen diversas fuentes posibles de radiación de ondas de radio. ¿Podría haber en la nebulosa del Cangrejo una estación emisora de radio titánica? No parece probable por diversas razones. Las señales procedentes de la nebulosa del Cangrejo no están moduladas, ni son inteligibles ocasionalmente, como ocurre a veces con las estaciones de radiodifusión, ni está limitada la emisión a una frecuencia o "banda". En su lugar, la radiación abarca una amplia gama de radiofrecuencias. Suena mucho a "estática". Cualquier cuerpo caliente emite radiación electromagnética a todas las frecuencias; rayos gamma, rayos X, luz ultravioleta, luz visible, radiación infrarroja y ondas de radio. Sin embargo, en radiación térmica, la intensidad de sus radiofrecuencias es inversamente proporcional al cuadrado de la longitud de onda y, en lugar de eso, se encuentra que la intensidad de la radiación del Cangrejo es casi la misma a muchas frecuencias; por tanto la emisión no puede ser térmica.

≪ Shklovskii demostró que la emisión de radio no térmica de la nebulosa del Cangrejo se puede explicar como radiación sincrotón, que es la que se observa en un sincrotón de electrones, sucesor del ciclotrón. En aquél, campos magnéticos intensos hacen que los electrones se muevan a velocidades muy elevadas que se acercan a la de la luz, restringidos a espirales a lo largo de las líneas de fuerza magnéticas. La aceleración a que se ven sometidos hace que emitan luz; regulando la aceleración se puede hacer que los electrones emitan luz de la frecuencia que se quiera, desde la visible hasta la región de ondas de radio. Si postulamos los campos magnéticos apropiados en la nebulosa del Cangrejo, la emisión de ondas de radio se puede explicar de modo análogo. ≫ Y lo mismo es cierto para toda la Galaxia. Las nebulosas normales tales como la M20 no presentan esta emisión de ondas de radio intensa.

≪ Si la nebulosa del Cangrejo es el vestigio de una explosión con una envolvente que se expande a 1000 km por segundo. ¿No podría haber partículas que se hubieran escapado hace mucho tiempo y que se movieran mucho más deprisa? Si la emisión de ondas de radio se debe a radiación sincrotón, entonces, tienen que haberse escapado más de una vez algunas de esas partículas rápidas, cargadas. ¿Es posible que las supernovas sean manantial de rayos cósmicos? (Véase el capítulo 5.)≫

Aplicando la teoría de la radiación sincrotón de electrones acelerados, el flujo medido de radioondas y conocida la distancia y dimensiones de la



Figura 7-6. Fotografía tomada con luz roja de la región de la intensa radiofuente Casiopea A. Se pueden apreciar débiles penachos de material nebular. (Cortesía de los Observatorios de Monte Wilson y Monte Palomar.)

nebulosa del Cangrejo, se puede estimar la cantidad total de rayos cósmicos que emite. Entonces, considerando la frecuencia estimada de aparición de supernovas en nuestra Galaxia, hallamos que el total de radiación cósmica emitida por las supernovas es suficiente para explicar la intensidad de la misma que se observa en la Tierra. Así pues, las pruebas parecen indicar que las supernovas son la fuente principal de rayos cósmicos en nuestra Galaxia. Además, esas explosiones enriquecen el espacio interestelar con elementos más pesados, lo cual es muy importante tanto para la evolución de las estrellas como para toda la Galaxia, tal como veremos en el próximo capítulo.

El Cangrejo posee otra característica digna de mención y es, como hice ver en 1953, que su radiación visual -al menos el 95 por ciento de ella- está producida también por electrones de alta energía como la emisión sincrotrón. La energía de los electrones que radian con longitudes de onda visuales es cien veces mayor que la de los que radian con longitudes de radioondas. Su energía llega a 0,1 - 1 erg/ electrón. Basándome en la entonces mi nueva explicación de la radiación óptica de la nebulosa del Cangrejo, predije que esa radiación tenía que estar polarizada. Las observaciones soviéticas y americanas han confirmado desde entonces esta deducción. A continuación se detectó radiación óptica sincrotón procedente de otros objetos; principalmente de radiogalaxias.

Todos los restos de supernovas, sin excepción, son potentes focos de radiación de radioondas. Hay una nebulosa en la constelación de Casiopea que tiene un flujo de radiación de longitud de onda de un metro, que es diez veces la correspondiente a la nebulosa del Cangrejo, aunque está casi tres veces más alejada. Sin embargo, este resto de supernova es una fuente muy débil de radiación óptica. (Véase la figura 7-6.) Se ha calculado que la explosión de Casiopea ocurrió hace unos 300 años y no se detectó entonces la estrella que hizo explosión porque estaba oculta en densas nubes de polvo interestelar.

La cantidad de radiación emitida ahora por las supernovas que se produjeron hasta hace 10000 años es muy diferente a la emitida, también ahora, por las explosiones más recientes. La nebulosa del Cisne (figura 7-4) es una radiofuente diez veces menos potente que la del Cangrejo.

La última supernova observada en la Vía Láctea - identificada por Johannes Kepler - tuvo lugar en 1604, antes de que se hubiera inventado el telescopio o descubierto el análisis espectral. Los datos recientes respecto al curso y mecanismo de esas explosiones se han conseguido únicamente a partir de las observaciones en otros sistemas estelares.

Esos datos indican que las supernovas se clasifican en dos categorías: tipo I y tipo II. Las supernovas del tipo I son estrellas viejas con masas sólo algo mayores que la del Sol; la radiación de su explosión es muy grande, aunque la masa de la nube gaseosa no excede en unas décimas la masa del Sol y se encuentran en las galaxias espirales y en las elípticas. Dichas supernovas tienen un tiempo característico determinado para que empiece a disminuir su brillo después de la explosión. Del examen de los datos chinos de 1054, podemos concluir que la nebulosa del Cangrejo fue una supernova del tipo I.

Las supernovas del tipo II sólo tienen lugar en las galaxias espirales. Inicialmente, son estrellas jóvenes, calientes, masivas; suelen ocurrir en los brazos espirales que es donde se localiza el proceso de formación de la estrella. Numerosas estrellas de la clase espectral O, probablemente acaban su vida espectacularmente debido a explosiones de este tipo. La masa de los gases expulsados excede en varias veces a la de nuestro Sol. El material

requiere, por tanto, para dispersarse, un tiempo considerablemente más largo que en las supernovas menos masivas del tipo I. La potente radiofuente de la constelación de Casiopea (figura 7-6) es resto de una supernova tipo II.

Hay varias hipótesis importantes que pretenden explicar las causas de esas tremendas esplosiones estelares. Con toda probabilidad se debe a la liberación repentina, catastrófica, de energía potencial gravitatoria que acompaña al colapso de las capas internas de la estrella. Se ha postulado que el interior que queda después de la explosión, sea un objeto más denso que las enanas blancas.

No hay ninguna hipótesis general aceptada que nos permita predecir cuando se producirá una supernova. La cuestión sobre si nuestro Sol se convertirá en supernova es un tema que interesa a la generación presente de seres humanos de la Tierra y a las futuras generaciones. Una explosión así vaporizaría por completo a todos los planetas, con las posibles excepciones de Júpiter y Saturno. Sin embargo, no hay razón para alarmarse. Podemos afirmar casi con toda certeza que, debido a su poca masa, el Sol nunca se convertirá en supernova.

≪ Es posible que algún día se pueda determinar qué estrellas están cerca de convertirse en supernovas. Todas las teorías modernas sobre supernovas precisan temperaturas muy altas en el centro de la estrella –de cientos de millones de grados o más. A esas elevadas temperaturas, los electrones y los positrones (electrones cargados positivamente) están colisionando entre sí a celeridades fantásticas; colisiones de las que a menudo resulta la conversión completa de la materia (el par electrón-positrón) en energía (por ejemplo, en forma de rayos gamma). Pero también sucede que la interacción electrón-positrón produce partículas mucho menos conocidas, el par neutrino-antineutrino. Un neutrino es una partícula elemental, parecida al fotón en algunos aspectos. Carece de masa y se mueve a la velocidad de la luz. La razón de que sea tan poco común es que el neutrino pasa sin esfuerzo a través de la materia. El total de neutrinos atraviesa el planeta Tierra con la misma facilidad que pasa la luz por el cristal de una ventana. Los neutrinos se descubrieron únicamente gracias a la paciente investigación de sus extrañas reacciones con la materia. A la temperatura de varios cientos de millones de grados, una estrella desprendería más energía como neutrinos que como fotones. Los neutrinos pasan al espacio a través de las capas que cubren a las estrellas. Cuando los telescopios de neutrinos sean factibles, será posible, en cierto sentido, escudriñar directamente en los núcleos más profundos de las gigantes rojas; las estrellas que están evolucionando gradualmente a supernovas se detectarán como fuentes de cantidades crecientes progresivamente de neutrinos y podremos predecir con mucha antelación cualquier supernova en potencia de nuestras inmediaciones estelares. ≫

Como ya se dijo anteriormente, las supernovas no son frecuentes. Pero nuestra Galaxia lleva tantos años de existencia, que probablemente se han producido bastantes desde la formación del sistema solar. ¿Pudo haber explotado alguna supernova relativamente cerca de nuestro planeta en el transcurso de su historia? Para responder a esta pregunta tenemos que hacer los siguientes cálculos sencillos.

Supongamos que en algún lugar de la Galaxia explotó hace 100 años una supernova tipo II. Una explosión así sólo acurre en una región estrecha próxima al plano galáctico, dentro de un espesor d de unos 100 parsecs. La órbita galáctica del Sol está ahora (y lo ha estado siempre) dentro de ese espesor. Consideremos una región esférica de radio R que rodea al Sol. Su volumen será $4/3\ \pi R^3$. Si r es el tamaño característico de los brazos espirales de nuestra Galaxia y d el espesor de la región del plano galáctico en el cual puede aparecer una supernova tipo II, entonces el volumen del disco en que dicha supernova puede aparecer es $\pi r^2 d$. (Véase el dibujo de la figura 7-7.) La razón de volúmenes de esas dos regiones, de esfera a disco, será $4/3\pi R^3 / /\pi r^2 d$. Esta razón de volúmenes es también la probabilidad de que, cuando la ocasión de explosión de supernova ocurra en algún lugar dentro de la Galaxia, el Sol estará de dicha explosión a una distancia igual o menor que R. ≪ En la figura 7-7 vemos que R tiene que ser siempre menor o igual que d. Por tanto, como $4/3\pi R^3$ es siempre menor que $\pi r^2 d$, la probabilidad de que el Sol esté cerca de cualquier explosión dada, es menor que 1, como tenía que ser, puesto que una probabilidad de 1 indica certeza de ocurrencia. ≫

Si ocurre una supernova, en promedio, cada T años, entonces la "próxima explosión" tendrá lugar al cabo de

$$t = \frac{\pi r^2 d}{\frac{4}{3}\pi R^3}\, T = \frac{3 r^2 d}{4 R^3}\, T \text{ años}$$

Demos ahora valores a la ecuación anterior. Suponiendo que $r = 10000$ parsecs, $d = 100$ parsecs y $T = 100$ años, resulta $t = 750$ millones de años.

Así pues, en los 4,5 mil millones de años de historia de la Tierra, el Sol ha estado varias veces a menos de 10 parsecs de la explosión de una supernova. Si consideramos válido el valor hallado para t, ha estado entonces $(4{,}5 \times 10^9)/(7{,}5 \times 10^8) = 6$ veces. Es posible que t sea menor porque la órbita galáctica del Sol lo lleva a veces a regiones en las que aparecen con más frecuencia las supernovas tipo II. ≪ También podría ser mayor si nuestra estima del período medio T de ocurrencia de una supernova fuera más largo. Con todo, parece bastante razonable la conclusión de que la Tierra en lo que lleva de vida ha estado varias veces a menos de 10 parsecs de una supernova. Este sencillo argumento geométrico es un buen ejemplo de la fuerza en física y astrofísica de los razonamientos de matemáticas elementales. ≫

¿Cuándo afectará a la Tierra la próxima explosión de una supernova? Si para entonces hay vida racional, verá en los cielos una estrella de brillo insólito. Será un millón de veces más brillante que Sirius (la estrella más brillante del cielo), pero 10000 veces menos brillante que el Sol. Por la noche, la estrella iluminará el campo.

Figura 7-7. Dibujo esquemático que representa a la Galaxia como un disco. Dentro de dicho disco hay una pequeña esfera con el Sol en el centro. El radio de esa esfera representa la distancia del Sol a una supernova próxima.

El flujo de radiación en la región del ultravioleta del espectro será diez veces mayor que la del Sol. Aunque esto dará lugar a un aumento significativo de la ionización en las capas altas de la atmósfera terrestre, no tendrá efectos biológicos catastróficos (considerando el oxígeno actual presente en la atmósfera). ≪ El ozono de la atmósfera absorbería toda la radiación ultravioleta antes que llegara a la superficie de la Tierra. Sin embargo, en los primeros tiempos de la historia de la Tierra (véase el capítulo 16) un aumento así de la intensidad ultravioleta podría haber tenido un significado más profundo para los sistemas biológicos. ≫

Si se produjera una supernova cerca de la Tierra, brillaría en el cielo unos meses y luego se debilitaría gradualmente. Alrededor de la estrella se formaría una nebulosa que se expandiría rápidamente a velocidad de miles de kilómetros por segundo y en unos pocos siglos cubriría una parte apreciable del cielo. Aunque el cielo de noche resplandecería a las longitudes de onda de luz características de esa nebulosa, la fluorescencia sería débil, apenas visible a simple vista. En unos miles de años, debido al efecto retardante gradual del medio estelar, disminuiría la velocidad de expansión. El gas que se expansionara llegaría a nuestro sistema solar aproximadamente al cabo de 10000 años. Luego, durante varias decenas de miles de años, el Sol y sus planetas quedarían dentro de una "nebulosa radio" procedente de supernova.

¿Qué pasaría en la Tierra? Primero aumentaría gradualmente la densidad de los rayos cósmicos principales, dado que las nebusosas radio son

fuentes de partículas de alta energía. Sin embargo, los rayos cósmicos se distribuyen de modo irregular dentro de esas nebulosas, por lo cual, durante algunos períodos —quizá de varios siglos— la intensidad de la radiación cósmica sería cien veces mayor que en otros.

Tal aumento en el flujo de rayos cósmicos primarios cabe pensar que tendría serios efectos sobre los organismos vivientes. La evolución de la vida en la Tierra se rige por selección natural. De entre las distintas variedades que hay de un organismo dado, sólo una fracción determinada es, por ventura, la más adaptada al ambiente y reproduce su clase. ≪ Las restantes perecen con el tiempo debido a, por ejemplo, competencia o predación. La variedad de tipos que hay para que actúe sobre ellos la selección natural, está determinada por la tasa de mutación, es decir, por la frecuencia de ocurrencia de los cambios biológicos heredables.

≪ Las mutaciones se deben a varios factores: la radiactividad natural del suelo, las aguas y el aire; el flujo de rayos cósmicos y gran número de otras causas —muchas desconocidas— posiblemente cambios químicos fortuitos en el material hereditario. Todo lo anterior contribuye a la tasa de mutación "espontánea" y se consideran mutaciones "espontáneas". En cierto aspecto la palabra "espontánea" es una manera de encubrir nuestra ignorancia de las causas que en verdad son responsables de que se presenten mutaciones hereditarias naturales. Un aumento en la intensidad de la radiación ambiental hace que aumente la tasa de mutación. La mayoría de las mutaciones son aleatorias y, en consecuencia, deletéreas. El material genético es un instrumento molecular sumamente afinado. La probabilidad de que una mutación perfeccione su funcionamiento es la misma que la de que un reloj que se tire desde lo alto de un edificio marche luego mejor. La posibilidad existe, pero es muy remota. Por otra parte, las mutaciones proporcionan la materia prima sobre la cual actúa la selección natural. Si no hubiera mutaciones, no habría material genético de posible adaptación a los cambios ambientales futuros y si la mutación fuera muy rápida, cualquier peculiaridad seleccionada desaparecería pronto. Luego, para cada organismo existe una tasa de mutación óptima. En realidad, los organismos influyen en la frecuencia de sus propias mutaciones. Hay regiones especializadas del material genético que pueden incrementar o disminuir la tasa de mutación general e incluso regiones que gobiernan las de características específicas. ≫

Como resultado, la respuesta biológica a un incremento de la radiación ambiental, varía de un organismo a otro. Las formas con ciclo reproductivo corto, a menudo precisan un aumento de las radiaciones de 100 a 1000 veces para duplicar su tasa de mutación. Por otra parte, en cambio, las de vida prolongada necesitan tan sólo que el aumento sea de 3 a 10 veces para lograr el mismo efecto.

En los momentos actuales, la radiación ionizante media del ambiente cerca de la superficie de la Tierra es de 0,12 roentgens por año. ≪ Un roentgen es una unidad arbitraria de dosis de radiación. ≫ Dos tercios de esa

radiación ambiental proceden de fuentes terrestres, principalmente de la radiactividad de la corteza. Aproximadamente, se deben a la radiación cósmica primaria 0,04 roentgens por año.

Si se incrementara 30 veces la intensidad de los rayos cósmicos, la dosis media de radiación cerca de la superficie de la Tierra aumentaría unas 10 veces – aumento que podría tener serias consecuencias genéticas para los organismos de vida larga. Serían principalmente vulnerables aquéllos que están sumamente especializados en nichos del medio ambiente muy circunscritos. Para tales formas, la exposición prolongada a esa dosis mayor durante un período de decenas de miles de años, cabe concebir que fuera catastrófica.

V. I. Krasovskii y yo hemos sugerido que la extinción de los dinosaurios a fines del período cretácico de la historia de la Tierra, aproximadamente hace cien millones de años, fue originada por un incremento así de rayos cósmicos ambientales. Suponemos que en esa epoca el Sol estaba situado en una radionebulosa a unos cinco a diez parsecs de una supernova recién explotada. Si la intensidad de la radiación cósmica ambiental hubiera aumentado entonces decenas o centenas de veces, el incremento en la tasa de mutación del dinosaurio pudo haber causado su desaparición. La vida de esos enormes reptiles casi seguro que era de varios cientos de años.

≪ Una dificultad de esta interesante suposición, es que predice la extinción de los dinosaurios en todos los lugares de la Tierra durante un período de tiempo relativamente corto y, en cambio, las pruebas paleológicas indican que la escala de tiempo para su extinción fue de unos 10^7 años; mucho más largo que el de 10^4 años que se deduce de la hipótesis de la supernova, a menos que se ocupara mucho tiempo en la reordenación por coincidencias de genes recesivos deletéreos.

≪ Son muchas, en realidad y no escasas, las causas propuestas para la extinción del dinosaurio. Un autor ha dicho que las condiciones climáticas variables de la Tierra a mediados del cretácico, evidentemente, eliminaron un helecho parecido a nuestras plantas contemporáneas que tenía propiedades laxantes. Según su punto de vista, los dinosaurios murieron de estreñimiento.

≪ No obstante, sin duda ha habido algunos efectos biológicos por explosiones de supernovas en la vecindad de la Tierra durante el tiempo geológico, aunque quizá no tan espectaculares como para hacer desaparecer los dinosaurios. ≫

De todos modos, el incremento prolongado de la dosis de radiación ambiental de alta energía, no tendría que ser fatal para todos los organismos vivos. Quizá incluso fuera favorable para la evolución de ciertas formas de vida y origen de algunas sustancias relacionadas con el origen de la vida en los comienzos de la historia de la Tierra.

Existe otra curiosa circunstancia que puede relacionarse con las supernovas. Más de diez años lleva sin explicación un detalle de nuestro cuadro de la distribución del ruido radiocósmico en el cielo. La intensidad de la emisión radio suele tender a concentrarse hacia el núcleo de la Vía Láctea

y el plano que contiene a sus brazos espirales. Sin embargo, esta regla no se cumple en una intensa lengua de radioemisión que se extiende por el cielo casi perpendicularmente a la Vía Láctea. La lengua empieza en una región apartada unos 30° del centro galáctico y se extiende casi hacia el polo norte galáctico, sobre el eje perpendicular al plano galáctico. En la figura 7-8 vemos un diagrama esquemático de los cielos en el que se muestran curvas

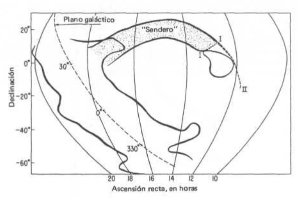


Figura 7-8. Dibujo esquemático que representa las isofotos de la emisión radio de la Vía Láctea. La región que se extiende hacia abajo a partir del vértice superior izquierdo está aproximadamente en el plano galáctico. El "sendero" es la región punteada que se proyecta fuera del plano.

que unen las regiones del cielo en las que es igual la claridad de las radioondas. Esas curvas, llamadas "isofotos", dan una representación gráfica de la distribución en el cielo de la intensidad de radiación radio. En ese croquis vemos claramente la concentración de la intensidad hacia el plano de la Vía Láctea en latitud galáctica 0°. Al mismo tiempo, es patente que a la izquierda del centro galáctico las isofotos de radiación radio cambian bruscamente hacia arriba, constituyendo una lengua o "sendero" inexplicable.

La hipótesis del radioastrónomo inglés Hanbury Brown y de sus colegas respecto a la naturaleza de esta anomalía, merece especial atención. Creen que puede ser la envolvente de ondas de radio de un supernova que explotó muy cerca de nuestro sistema solar hace varias decenas de miles de años.

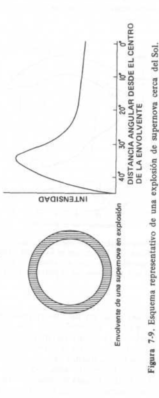


Figura 7-9. Esquema representativo de una explosión de supernova cerca del Sol.

Como esta envolvente está a una distancia de 30 a 40 parsecs y sus dimensiones lineales cubren de 30 a 40 parsecs, debe ocupar una vasta parte del cielo. En la figura 7-9 se representa esto. No obstante, la hipótesis de Brown presenta inconvenientes: no hay ningún rastro óptico de supernova en esa parte del cielo. Recientemente, en la parte sur del cielo se ha detectado otra lengua de radioondas. La presencia de restos de dos supernovas, que explotaron ambas cerca del Sol en las últimas decenas de miles de años, parece muy poco probable y es de suponer que esas características de las ondas de radio han de tener otra explicación. Pero si las futuras investigaciones confirman la hipótesis de Brown, a pesar de esos inconvenientes, entonces, al cabo de algunos miles de años puede aumentar en el sistema solar la densidad de radiación cósmica diez veces, cuando la radiación de la supernova llegue a la Tierra. Quizá incluso la radiación que tenemos ahora es anormalmente grande en relación a la que había durante la evolución de la vida en la Tierra. Confiamos que pronto se halle la solución a este interesante problema de física cósmica.

8

El origen de los elementos

(Los átomos) se mueven en el vacío y cogiéndose unos a otros chocan juntos y algunos retroceden en cualquier dirección que acaso sea al azar, y otros se enmarañan entre sí de distintos modos según la simetría de sus formas y tamaños y posiciones y orden, y permanecen juntos y así se efectúa la llegada a los entes de cosas compuestas.
Simplicio (siglo VI d. J. C.)

Creo que una hoja de hierba no es más que el trabajo de un día de las estrellas
Walt Whitman, *Hojas de hierba*

¿Cuál es el origen de la materia? ¿Se hicieron juntos los elementos químicos, a la vez, o evolucionaron a lo largo del tiempo uno tras otro? Hace cincuenta años, esto hubiera carecido de sentido científico. ¡El origen de los elementos! Ahora, por lo menos, creemos que sabemos los procesos básicos que implican. Ha habido controversia entre los partidarios del origen evolutivo y los de la creación independiente, que recuerda algo a la polémica que siguió a la publicación en 1859 de *El origen de las especies* de Charles Darwin. Y ahora parece que el origen de los elementos tiene lugar principalmente en los interiores recónditos de las estrellas rojas gigantes. Por esta hipótesis, no sólo puede explicarse la abundancia cósmica de elementos observada, sino que hay también pruebas directas de la formación de elementos en las estrellas. El ejemplo más sorprendente de esas pruebas directas es el descubrimiento del elemento tecnecio en las atmósferas de las estrellas gigantes.

≪ El tecnecio es un elemento muy inestable. Dado un fragmento de la clase de máxima duración, la mitad de él pasaría a convertirse en otros elementos en unos 200 000 años. Si se hubiera producido en los comienzos de la historia del sistema solar, ahora no habría nada de él en la superficie de la Tierra, puesto que su vida es tan corta. Esta suposición está confirmada. En realidad, es precisamente la ausencia de tecnecio de formación natural en la Tierra y el hecho de que sólo pueda lograrse sintéticamente en los aceleradores nucleares, lo que ha dado lugar a su nombre. Es claro que 200 000 años es mucho menos que la vida de una estrella; por tanto, el tecnecio tiene que formarse cerca de la superficie de las estrellas gigantes o en su interior y ser transportado fuera en tiempos inferiores a los 200 000 años.

≪ El tecnecio es sólo uno del centenar o así de elementos que se conocen. Cada elemento se caracteriza por su número atómico, que es simplemente el número de electrones alrededor del núcleo atómico. (Véase el capítulo 4.)

A la suma del número de neutrones y protones en el núcleo atómico se le llama peso atómico y se escribe como supraíndice a la derecha del símbolo químico, como por ejemplo He^4. Como el átomo es eléctricamente neutro, el número de protones en el núcleo tiene que ser igual al de electrones circundantes. Por tanto, la diferencia entre peso atómico y número atómico es igual al número de neutrones en el núcleo.

≪ Como las propiedades químicas se determinan sólo por el número de electrones, la indicación del número atómico es equivalente a la especificación del elemento. Así pues, el número atómico 1 indica el hidrógeno; el número atómico 6 significa carbono, etc. Cambiando el número de neutrones,

pero manteniendo fijos los de protones y electrones, obtendremos diferentes *isótopos* del mismo elemento químico. Así encontramos C^{12}, que es la forma más abundante de ocurrencia natural del carbono o sea son seia protones y seis neutrones. Sin embargo, también existe el C^{13}, con siete neutrones y el C^{14}, con ocho electrones. El C^{13} y el C^{14} son radiactivos por naturaleza, es decir, tienen tendencia a transformarse espontáneamente en otro isótopo, ya sea de carbono o de algún otro elemento, en tiempos cortos comparados con la edad del sistema solar. El cambio espontáneo de C^{14} se usa mucho para saber por radiactividad la edad de la materia orgánica. Por análisis de la materia química en la corteza terrestre y en los meteoritos y espectroscopia astronómica, ha sido posible determinar la distribución cósmica de muchísimos de los isótopos de los elementos químicos conocidos. En la tabla I del capítulo 4, en la que aparece la distribución cósmica resultante de los isótopos más estables de algunos elementos corrientes, vimos que, con gran diferencia, el hidrógeno y el helio son los elementos más abundantes del universo. En el capítulo 6 sobre la evolución estelar, hemos visto que reacciones tales como

$$
\begin{aligned}
4H^{1} &\longrightarrow He^{4} + \text{energía}\\
3He^{4} &\longrightarrow C^{12} + \text{energía}\\
C^{12} + He^{4} &\rightarrow O^{16} + \text{energía}\\
O^{16} + He^{4} &\rightarrow Ne^{20} + \text{energía}\\
Ne^{20} + He^{4} &\rightarrow Mg^{24} + \text{energía}\\
Mg^{24} + He^{4} &\rightarrow Si^{28} + \text{energía}\\
Si^{28} + He^{4} &\rightarrow S^{32} + \text{energía}\\
S^{32} + He^{4} &\rightarrow Ar^{36} + \text{energía}\\
Ar^{36} + He^{4} &\rightarrow Ca^{40} + \text{energía}
\end{aligned}
$$

son las sucesivas fuentes de energía de una estrella a medida que va evolucionando. Estas síntesis consecutivas de elementos de pesos atómicos que son múltiplos de cuatro dan cuenta de la gran abundancia cósmica de elementos corrientes. Los núcleos de helio, simbolizados por He^{4}, se llaman también partículas alfa. Las temperaturas en el interior de las estrellas son, evidentemente, tan altas, que todos los átomos están ionizados. Las reacciones sucesivas con partículas alfa forman elementos de pesos atómicos cada vez mayores.

≪ ¿Puede continuar indefinidamente este proceso? La respuesta es, no. Después de la formación de Fe^{56}, que es el isótopo más abundante del hierro, las reacciones siguientes con partículas alfa producen elementos que son inestables por naturaleza y espontáneamente vuelven a convertirse en hierro o en otros elementos. Se necesitan algunos otros procesos para explicar la síntesis de elementos con peso atómico superior a 56 y la de aquellos otros intermedios cuyos pesos atómicos no son múltiplos de cuatro. No obstante, la forma general de la abundancia cósmica de los elementos puede

comprenderse a partir de la reacción del protón cuatro y los sucesivos procesos alfa solos.

≪ La configuración general de la distribución cósmica de los elementos muestra una disminución de la abundancia a medida que aumenta el peso atómico. Esto era del todo de esperar de los procesos alfa, porque los elementos de número másico más alto tienen que esperar a que les llegue el turno a su síntesis ya que primero tienen que hacerse los isótopos de número másico menor. Una de las excepciones principales al suave declinar de la abundancia cósmica con el incremento del peso atómico, es el caso de los elementos cercanos al hierro. Puesto que el Fe^{56} es el isótopo de número másico más alto que puede hacerse por procesos alfa, tiende a formarse un cúmulo de productos nucleares cerca de este isótopo. ≫

En el capítulo 6 hemos indicado que próximas al final de la evolución de su vida, las rojas gigantes se desprenden, por una de las distintas formas, de sus envolventes gaseosas exteriores, que luego se difunden gradualmente en el espacio interestelar. Así, durante la evolución de una estrella, parte de su masa vuelve al medio interestelar del que surgió. Las siguientes generaciones de estrellas, que se forman de nuevo a partir del medio interestelar, estarán compuestas en parte de los despojos de sus predecesoras. Dado que la fracción principal de la masa de una estrella no se proyecta al espacio, sino que con el tiempo acaba en el interior de una enana negra, es claro que con el paso del tiempo disminuye la cantidad de materia en el espacio interestelar.

≪ La sucesión de reacciones nucleares antes descrita es apropiada para una estrella formada inicialmente sólo de hidrógeno. Los procesos alfa dominan su siguiente evolución química y cuando pasa por la fase de gigante roja proyecta al medio interestelar los nuevos isótopos formados, tales como C^{12}, O^{16}, etc. Así, si la galaxia hubiera estado compuesta en su principio sólo de hidrógeno, la composición química del medio interestelar se hubiera ido enriqueciendo gradualmente, con el tiempo, con elementos más pesados. Si entonces se forma en ese medio interestelar una segunda generación de estrellas, además de hidrógeno tendrán cantidades menores de helio, C^{12}, O^{16} y así sucesivamente: La presencia de estos isótopos, incluso en pequeñas cantidades, durante la fase de quema de hidrógeno de la serie principal, lleva a reacciones nucleares que son imposibles en una estrella formada exclusivamente de hidrógeno puro. Al C^{12} se le agregan protones y tras algunas reacciones intermedias produce C^{13}, C^{14} y N^{15}. El Ne^{20} forma, sucesivamente, Ne^{21}, Ne^{22} y Ne^{23}. De igual forma se puede sintetizar la mayor parte de los isótopos intersticiales.

≪ La síntesis de los elementos de número másico mayor que el del hierro se cree que ocurren por captura de neutrones, los cuales se producen en los interiores estelares por reacciones tales como

$$Ne^{21} + He^{4} \rightarrow Mg^{24} + \text{un protón}$$

Por captura sucesiva de neutrón se pueden sintetizar elementos pesados hasta el Bi^{209} . La captura de un neutrón por el bismuto y los elementos más pesados, no suele conducir a la síntesis de elementos más complejos porque los nuevos que se obtienen son tan radiactivos que desaparecen inmediatamente. Pero si la aportación de neutrones fuera muy grande, la construcción de los elementos pesados podría ocurrir antes de que tuvieran oportunidad de transformarse espontáneamente y se cree que ese gran flujo de neutrones sólo es posible durante la explosión de una supernova. La existencia en la Tierra de los elementos oro y uranio proporciona una demostración patente de que el material a partir del cual se formó una vez la Tierra procedía de una supernova. La influencia de estos dos productos de supernova –el oro y el uranio– es sorprendente en la historia reciente de la humanidad. Posiblemente hay otros planetas en la Galaxia, formados en regiones donde ocurren pocas explosiones de supernovas. ¿Son sus habitantes más felices por no tener ni oro ni uranio? ≫

Si es cierto que los elementos siguientes al bismuto sólo se forman en las supernovas, entonces, la abundancia de esos elementos nos tiene que decir algo respecto a la frecuencia a que aquéllas aparecen. En el capítulo 7 vimos que las supernovas del tipo II ocurren en las estrellas masivas, jóvenes y que su velocidad de formación depende en gran manera de la densidad del medio interestelar. Existen algunas razones para creer que esa velocidad es proporcional al cubo de la densidad. Así, al principio de la historia de la Vía Láctea, cuando la densidad del gas interestelar era considerablemente mayor que ahora y la velocidad de formación de una estrella mucho más elevada, las supernovas tenían que explotar con mucha más frecuencia que hoy en día. Los cálculos dan que cuando la Galaxia no llegaba a los mil millones de años, la frecuencia de las explosiones era, aproximadamente, 100 veces mayor que ahora. ≪ Esto corresponde a una densidad interestelar sólo un poco más que 5 veces el valor actual, puesto que la raiz cúbica de 100 es 4,7. La frecuencia actual de explosiones de supernovas en nuestra Galaxia es de una por siglo y, por tanto, de 10^7 cada mil millones de años. Si en los primeros mil millones de años la frecuencia era 100 veces mayor que ésta, podemos entonces ≫ llegar a la conclusión de que desde que nació la Vía Láctea ha habido, aproximadamente, mil millones de supernovas. Este número explica completamente el contenido observado de elementos más pesados que el bismuto de la Galaxia. ≪ Obsérvese, sin embargo, que este cálculo supone implícitamente que el mecanismo de la explosión de una supernova no depende de la presencia de elementos pesados. ≫

Las estrellas más antiguas de nuestra Galaxia son las subenanas y las de los cúmulos globulares que tienen una masa menor que 1,2 veces la del Sol. Más que ningunas otras estrellas, suponemos que conservan, al menos en sus capas exteriores, la distribución original de los elementos característicos del medio a partir del cual se formaron. Y, efectivamente, se ha visto que el contenido de elementos pesados en esas estrellas viejas es unas diez veces menor que en el Sol. El hecho de que las estrellas de la serie principal son

mucho más ricas en elementos pesados que las subenanas puede pues explicarse por el enriquecimiento continuo del medio interestelar por la proyección de materia estelar.

≪ De las observaciones espectroscópicas del Sol resulta claro que no es una estrella de primera generación y, probablemente, ni siquiera de segunda o sea que, muchos de los átomos que lo constituyen, estuvieron en el pasado dentro de otras estrellas; estrellas que hace mucho pasaron ya a enanas blancas. Y nuestros propios átomos se cocieron también en las entrañas de las estrellas. Nuestros huesos están formados por calcio originado por procesos alfa en alguna roja gigante hace miles de millones de años y lo mismo es cierto para el hierro de nuestro torrente sanguíneo y el carbono, el nitrógeno y el oxígeno que constituyen todos nuestros tejidos. Quizá únicamente el hidrógeno que en nuestros cuerpos se halla enlazado al C, N y O se libre de esa procedencia. Es el más antiguo de todos los elementos y si es que llegó a formarse, allá en el evo, en la escala de tiempo más grande imaginable, fue por procesos que aún hoy día, con nuestros conocimientos de la síntesis de todos los demás elementos, no podemos ni siquiera imaginar.

≪ Los átomos, que por espectroscopia nos señalan su presencia en las estrellas remotas, son iguales que sus congéneres de aquí. El átomo de hierro que vemos en ζ Ursae Majoris (figura 4-3) es exactamente igual que el de las vigas de una casa. Es uno de los triunfos de la espectroscopia astronómica el que sepamos hoy que el universo esté constituido exactamente con las mismas clases de átomos que están presentes aquí en la Tierra.

≪ A mediados del siglo pasado, el filósofo francés Auguste Compte estaba buscando un ejemplo de algo cuyo conocimiento nunca lo alcanzara un ser humano ¡Infeliz! Escogió la composición química de las estrellas. Menos de medio siglo después, la espectroscopia astronómica estaba en pleno esplendor. Los pronósticos negativos son arriesgados. No sólo conocemos la composición química de las estrellas, sino que sabemos cómo se formaron los elementos. Y de la misma forma se hicieron los átomos de ζ Ursae Majoris y de las vigas de acero. Simplemente se han aplicado a usos distintos. ≫

9

Evolución de las galaxias

Podemos sacar una conclusión adicional muy importante de la disolución gradual de la Vía Láctea: En efecto, el estado en que la acción incesante de la fuerza aglomerante la ha traído al presente, es una clase de cronómetro que puede utilizarse para medir el tiempo de su pasado y de su existencia futura y aunque no sabemos a qué velocidad marcha ese misterioso cronómetro, no es, sin embargo, menos cierto que puesto que el desmembramiento de las partes de la Vía Láctea da una prueba de que no puede durar para siempre, igualmente atestigua que no puede admitirse infinita su antigüedad en el pasado.

William Herschel, *La construcción de los cielos* (1811)

≪ Cuando se utilizan grandes telescopios y tiempos de exposición prolongados para captar la luz de fuentes muy lejanas fuera del plano de la Vía Láctea, se llega a alcanzar un punto en el que pueden verse más galaxias remotas que estrellas en primer plano. Puede haber más galaxias dentro del alcance del telescopio de 200 pulgadas de Monte Palomar, que estrellas en nuestra propia Galaxia. Al fotografiar objetos más tenues que los de decimoctava magnitud, podemos obtener una visión del universo como la de la figura 3-15, en la que se aprecian galaxias espirales con diferentes grados de desarrollo de los brazos; galaxias de frente, de perfil y con todas las inclinaciones intermedias. Vemos galaxias cirrosas en las que casi no se aprecia la forma elíptica y muchas otras sin ninguna forma, irregulares. En cualquier dirección que se observe es igual el panorama. (Debido a la densa concentración de estrellas y polvo en nuestra Galaxia, no podemos ver las que están al otro lado de su núcleo.)

≪ Sin embargo, las galaxias no están distribuidas uniformemente. A veces están agrupadas, como las "Quintillizas de Stefan" de la figura 9-1, las cuales están conectadas por nubes de gas. También hay asociaciones más sueltas, tales como nuestra propia Galaxia, la M31, la M33, las Nubes de Magallanes y un puñado de ellas de formas elípticas e irregulares, cercanas, denominadas el "grupo local".

≪ Más allá del grupo local hay otros cúmulos galácticos; algunos mucho más ricos que el grupo local. El más próximo de esos es el cúmulo de Virgo, aproximadamente a 40 millones de años luz. A más de 60 millones de años luz, el número de galaxias desciende inesperadamente y no hay cúmulos ricos a distancias mucho más grandes. Esto nos ha llevado a sospechar que los cúmulos de galaxias puedan a su vez agruparse en supercúmulos. ¿Es posible que los supercúmulos a su vez se conglomeren en cúmulos de cúmulos de cúmulos? ¿Está dispuesto el universo en una retrogradación infinita de tales acumulaciones formando una jerarquía majestuosa e infinita?.

≪ Dado que la yuxtaposición casual de galaxias en una asociación de esta clase es muy poco probable, tiene que haber alguna relación física, posiblemente gravitatoria, entre los miembros de un cúmulo de galaxias determinado. Además, como es muy difícil que las galaxias lleguen a reunirse por encuentros aleatorios, la existencia de sus cúmulos constituye algún nexo para el origen de las galaxias. ¿Hay galaxias, como estrellas, formadas colectivamente, en grandes asociaciones que sólo se disipan posteriormente? ≫

Se supone que hace unos 10 ó 20 mil millones de años, existió una vasta, pero difusa nube de gas a una temperatura muy alta. La composición



Figura 9-1. Grupo de Galaxias en la constelación de la Serpiente en las que se aprecian puentes gaseosos que las unen. Este grupo se conoce como Quintillizas de Stefan. (Cortesía de los Observatorios de Monte Wilson y Monte Palomar.)

química de esa nube difería sustancialmente de la actual del gas interestelar. Es posible que el hidrógeno fuera el único elemento existente y quizá tan sólo en la forma de sus partículas constituyentes, es decir, protones y electrones. ≪ La producción de todos los demás elementos, según esta idea, tuvo lugar más tarde en el interior de las estrellas. ≫ Se cree que las diversas regiones de la nube se atrajeron entre sí por gravedad, dando por resultado la contracción de la nube y el aumento de su densidad, exactamente igual que se postuló para el origen de las estrellas. A medida que aumentaba la densidad, tuvieron que incrementar las frecuencias de las colisiones entre protones y electrones, así como la emisión de radiación resultante. Cuando la nube se enfrió, la presión interna del gas fue incapaz de soportar el peso del material sobre él y la contracción continuó a ritmo aún mayor.

Algunos cálculos matemáticos indican que con una condensación así, irremediablemente la nube se fragmentaría en masas menores, que muchos astrónomos opinan que son las predecesoras de los cúmulos de galaxias. La energía potencial de la nube original, liberada durante la contracción, se transformó en la energía cinética que puso en movimiento los diferentes fragmentos gaseosos. La contracción continuada en cada uno de los fragmentos condujo a la descomposición secundaria en masas gaseosas todavía menores, animada cada una de altas velocidades desordenadas. Se cree que esas masas secundarias fueron las formas nacientes de las distintas galaxias. Cada una de estas protogalaxias recién formadas, contrayéndose nuevamente bajo la influencia de sus gravedades respectivas, se fragmentaron una vez más en masas más pequeñas, que más tarde se convirtieron en cúmulos estelares. ≪ La cuarta fragmentación de los cúmulos globulares llevó –se supone– a las distintas estrellas de la primera generación o sea, a aquellas compuestas enteramente o casi enteramente de hidrógeno. Una de las muchas cuestiones sin resolver de esta hipotética jerarquía de condensaciones es la siguiente: ¿Por qué las fuerzas que llevaron a las fragmentaciones precedentes no fragmentaron también a las estrellas en unidades menores? ¿Por qué son las estrellas los productos finales estables de la fragmentación jerárquica? ≫

En esa remota época de las fragmentaciones, las velocidades relativas de las diferentes condensaciones eran muy elevadas y las protogalaxias debieron haber tenido una forma aproximadamente esférica. Las pruebas a favor de este argumento se pueden hallar en la distribución espacial de las estrellas de la primera y segunda generaciones y en la de los cúmulos globulares más antiguos. Estos objetos forman sistemas casi esféricos alrededor del centro de nuestra Galaxia, cuyo recuento aumenta hacia el centro galáctico y no hacia el plano galáctico. ≪ Esas estrellas viejas y cúmulos globulares tienen que haberse formado en una época en que la Galaxia no se había condensado aún hacia el plano actual de la Vía Láctea. Cuando el gas y el polvo se contrajeron entonces hacia ese plano, aquellas estrellas que primero se habían formado quedaron atrás. La figura 9-2 esboza la forma primitiva de la Vía Láctea.

≪ En realidad, es fácil comprender por qué las galaxias que en un principio eran esféricas o irregulares acabaron tomando la forma de disco: ≫ Las colisiones entre sí de las distintas partículas de gas de la protogalaxia, elevaron la temperatura de la nube; la nube caliente radió entonces al espacio, de lo que resultó una pérdida de energía cinética y los movimientos de las partículas relativamente frías fueron dominados por las fuerzas de gravedad, que las llevaron hacia el plano galáctico. En consecuencia, las estrellas que más tarde se formaron quedaron muy concentradas hacia el disco.

≪ Una protogalaxia que estuviera girando incluso muy lentamente cuando comenzó la condensación, hubiera tenido que girar mucho más

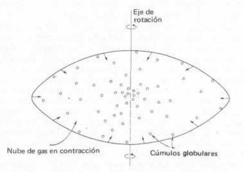


Figura 9-2. Representación esquemática de una galaxia en proceso de formación. Cuando la nube de gas se colapsa hacia el núcleo, aumenta en velocidad de rotación. Por fuera de la nube de gas en contracción se condensan los cúmulos estelares globulares, con preferencia en las regiones de densidad alta.

deprisa al progresar la contracción, a causa del principio de conservación de la cantidad de movimiento. El caso nos lo podemos representar fácilmente tomando un ladrillo en cada mano y sentándonos en un taburete de piano con los brazos extendidos. Que alguien nos haga dar vueltas; cerremos entonces los brazos y el resultado es sorprendente: La contracción a lo largo del eje de rotación (con el taburete de piano las piernas quedan según el eje de rotación) es fácil, porque no hay fuerza de rotación que se oponga a ella. En cambio, en cualquier plano normal al eje de rotación, es muy difícil porque las fuerzas centrífugas se oponen a las gravitatorias de la contracción.

Por lo tanto, en el caso de una protogalaxia, el efecto resultante de la atracción gravitacional y de las fuerzas de rotación es un sistema rotatorio que se aplana muy deprisa, en el que el material se contrae a lo largo del eje de rotación, pero no en sentido perpendicular a él. La misma circunstancia explica por qué los planetas en el sistema solar están en un plano, por qué los sistemas de satélites de los distintos planetas están en un plano y por qué el Sol y todos los planetas están ligeramente achatados según sus ejes de rotación. ≫

Hemos reseñado la hipótesis en vigor sobre los orígenes de las galaxias. ≪ Todos los astrónomos están conformes en que muchos aspectos de la misma están aún por terminar. Nuestra suposición sólo puede comprobarse examinando otras galaxias. ≫ Como ya se indicó en el capítulo 3, existen grandes variaciones entre las distintas categorías de galaxias. ¿Cómo pueden explicarse esas diferencias? ≪ ¿Hay una evolución de los tipos galácticos semejante a la de los tipos estelares? Recordemos que las características de una estrella se determinaban principalmente por su masa inicial, composición y edad actual. En opinión de muchos astrónomos. ≫ las de una galaxia se determinan por su masa inicial, su edad actual y su velocidad de rotación inicial, es decir, la velocidad de rotación de la protogalaxia. Por ejemplo, si la masa galáctica inicial es relativamente pequeña, la densidad media del gas interestelar será más bien baja y la formación de la estrella tendrá lugar lentamente. Efectivamente, la formación de estrellas de primera generación en cantidad apreciable puede llegar a necesitar varios miles de millones de años. Las Nubes de Magallanes pueden ser ejemplo de una galaxia así. En estas galaxias irregulares hay estrellas jóvenes, masivas y sumamente calientes, que por investigaciones espectroscópicas se ha visto que sólo contienen pequeñas cantidades de elementos pesados.

Si la masa inicial de la protogalaxia es grande, pero su velocidad de rotación pequeña, la formación de la estrella puede suceder muy deprisa. Rápidamente se condensaría el medio interestelar en forma de estrellas y disminuiría igualmente con rapidez la densidad del gas. Además, la formación se produciría en esas galaxias sólo hacia el núcleo, que es donde podría concentrarse el gas interestelar residual. Con el tiempo llegaría a cesar toda formación de estrellas y tales galaxias se caracterizarían entonces por su escasez de gas y polvo y por tener estrellas muy evolucionadas. Las galaxias elípticas (como, por ejemplo, la de la figura 3-8) muestran esas peculiaridades. Si la protogalaxia es masiva y además gira con relativa rapidez, cabe esperar que se formen brazos espirales y se desarrolle una galaxia semejante a la de nuestra propia evolución.

≪ Lo anterior es un proyecto de evolución galáctico, en el cual tienen orígenes independientes las irregulares, las elípticas y las espirales y por tanto no dependen unas de otras. La presentación de otro proyecto, tal como el que exponemos a continuación, del astrónomo americano Allan Sandage, de los observatorios de Monte Wilson y Monte Palomar, puso de manifiesto el grado de incertidumbre de nuestros conocimientos actuales

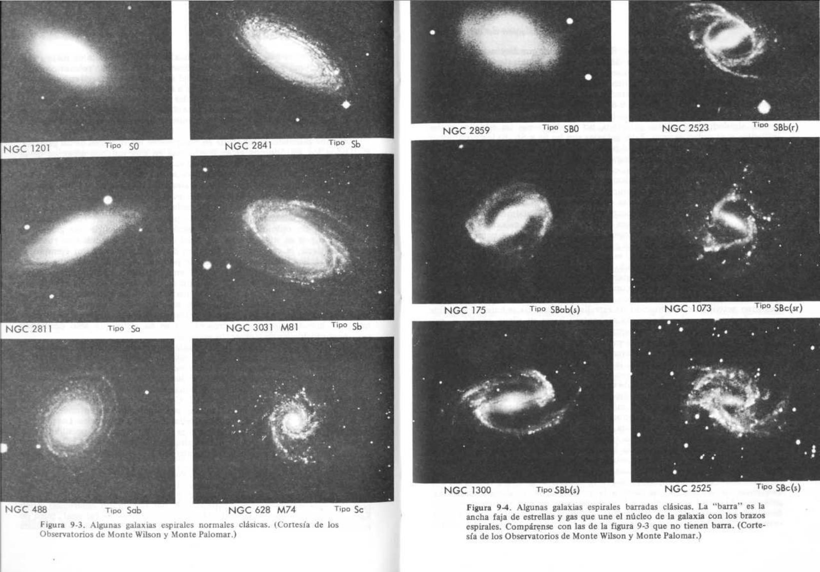


Figura 9-3. Algunas galaxias espirales normales clásicas. (Cortesía de los Observatorios de Monte Wilson y Monte Palomar.)

Figura 9-4. Algunas galaxias espirales barradas clásicas. La "barra" es la ancha faja de estrellas y gas que une el núcleo de la galaxia con los brazos espirales. Compárense con las de la figura 9-3 que no tienen barra. (Cortesía de los Observatorios de Monte Wilson y Monte Palomar.)

sobre la evolución de las galaxias. Sandage observa que hay una correspondencia íntima entre la presencia de polvo en las galaxias y la de estrellas jóvenes O y A muy brillantes; luego, donde haya polvo tienen que estar formándose estrellas. Tales estrellas jóvenes están presentes en las galaxias irregulares (Irr), las espirales ordinarias del tipo *c* (Sc) y las espirales barradas del tipo *c* (SBc). En las figuras 9-3 y 9-4 se ilustran estas y otras galaxias espirales. Además, siempre que los brazos espirales estén arrollados estrechamente alrededor del núcleo galáctico, no pueden verse las estrellas azules brillantes y el polvo es raro. Tales galaxias son las Sa y Sb. Es lógico suponer que en esas galaxias se ha agotado el polvo en procesos previos al de formación estelar y que en la época actual rara vez tiene lugar el origen de una estrella si es que llega a originarse. En tal caso, si el arrollamiento compacto de los brazos espirales es indicio de galaxia muy evolucionada, podemos imaginar a los brazos arrollándose en el núcleo al girar aquélla. Las galaxias de los tipos Sa, SBa, SU, Sb y todas las elípticas, no presentan estrellas jóvenes brillantes y carecen casi por completo de polvo. Finalmente, el espectro integrado de los miles de millones de estrellas de esas galaxias muestra las características de estrellas sumamente evolucionadas, tales como las rojas gigantes. Es posible que haya gran cantidad de enanas blancas, pero debido a la poca luminosidad que tienen, es probable que pasen desapercibidas sus contribuciones al espectro integrado de las galaxias.

≪ Los datos anteriores sugieren el siguiente aspecto de la evolución galáctica: Las protogalaxias son configuraciones caóticas que se contraen, de gas y polvo del medio intergaláctico. A medida que avanza el tiempo, aparece una gran actividad de formación de estrellas y la galaxia se hace reconocible como de tipo irregular. Entonces se contrae hacia su plano medio y, por algunos procesos no del todo comprendidos, le salen unos brazos espirales, de forma abierta, que le siguen la pista y en los cuales se concentra el polvo y tiene lugar con preferencia la formación de las estrellas. Es posible que sean campos magnéticos los que rijan la formación de los brazos espirales pero, por el momento, aparecen muy oscuros los detalles de este proceso. A medida que las sucesivas generaciones de estrellas consumen el gas interestelar y el polvo, disminuye la densidad del medio, aumenta el número de estrellas muy evolucionadas y se cierran más y más hacia el núcleo los brazos espirales. La galaxia pasa de Sc, a Sb y Sa (o por la secuencia correspondiente de espiral barrada). Con el tiempo, en esencia, todo el gas y polvo se ha utilizado en la formación de estrellas, los brazos espirales se han arrollado por completo alrededor del núcleo y la galaxia se caracteriza entonces por sus estrellas viejas, evolucionadas, que tienen movimientos desordenados y no se limitan ya al plano galáctico; se produce una SO, o sea una galaxia elíptica. ≫

También en otras hipótesis sobre la evolución galáctica se atribuye la existencia de los brazos espirales a la presencia de un campo magnético galáctico. El astrofísico soviético N. S. Kardashev, del Instituto Astronómico Sternberg, ha supuesto que el campo magnético de cualquier galaxia es de origen metagaláctico. Cuando en el desarrollo de la protogalaxia se contrae el gas intergaláctico, el propio campo magnético tiene que contraerse también, aumentar en intensidad y enrollarse por la rotación de la galaxia. Desarrollando estas ideas, el astrofísico australiano J. H. Piddington, indica que la intensidad de un campo magnético galáctico así formado depende del ángulo entre la orientación del campo metagaláctico y el eje de rotación de la galaxia. Por ejemplo, si este ángulo es pequeño, el campo magnético será relativamente débil. Y aún más recientemente, el astrofísico soviético S. B. Pikelner, también del Instituto Sternberg, ha ampliado estos conceptos y desarrollado una teoría metódica que pretende explicar las múltiples formas de galaxias y, en particular, sus estructuras espirales.

Se necesita todavía mucho más empeño, tanto en observaciones como teórico, para poder resolver las incompatibilidades entre esas hipótesis y determinar la validez de sus características comunes. Además de las cuestiones respecto a las relaciones entre los diferentes tipos galácticos, tampoco comprendemos del todo materias tales como el origen de los brazos espirales o la razón de la diferencia entre los normales y los barrados. Tan sólo se está empezando a investigar el importante problema de la naturaleza del núcleo galáctico y la prometedora técnica de analizar el espectro combinado de toda una galaxia, en función de los espectros de las estrellas que la componen, está todavía en pañales.

≪ Sin embargo, cada día hay más realidades que demuestran que cualquiera que fuera el proceso, la evolución de las galaxias no fue ciertate tranquilo. En los núcleos de las galaxias tienen lugar acontecimientos violentos, que a veces los podemos detectar viendo el desplazamiento real de la materia. Por ejemplo, en la galaxia M82 hay un lanzamiento hacia afuera de materia estelar que sale del núcleo. Esa proyección se puede observar en las fotografías de M82 tomadas con la luz emitida por los átomos de hidrógeno de dicha galaxia. (Véase la figura 9-5.) En el caso de nuestra propia Galaxia, hay pruebas por observaciones de radioondas en los 21 cm del hidrógeno neutro, de que están saliendo grandes cantidades de gas del centro en el plano galáctico. La velocidad de esa efusión es tan grande, que si hubiera sido así durante los últimos 10^{10} años, no quedaría gas en el núcleo galáctico. Así pues, el gas del núcleo galáctico se rellena a partir de alguna fuente, tal como el halo, o ese flujo es de ocurrencia temporal.

≪ Muchas galaxias son radiofuentes. La emisión parece deberse a radiación sincrotrón en la cual las partículas cargadas energéticas están obligadas a moverse en regiones limitadas del espacio debido a campos magnéticos relativamente intensos. Las partículas más energéticas son las que producen la radiación de frecuencia más alta, pero, por la misma razón, las que antes pierden su energía. Si no hay ningún foco de realimentación de esas partículas de alta energía, se puede calcular la vida efectiva de radiación de radiofrecuencia de una radiogalaxia, así como el tiempo necesario para que se disipe la materia arrojada violentamente desde el núcleo y resulta que ambos períodos son pequeños, comparados con la vida de una galaxia y quedan

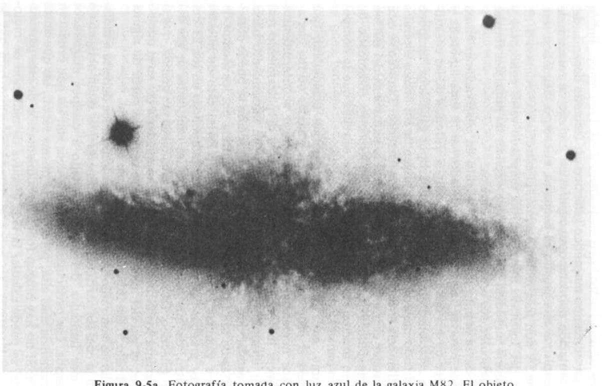


Figura 9-5a. Fotografía tomada con luz azul de la galaxia M82. El objeto de esta fotografía es poner de manifiesto la distribución general de estrellas, gas y polvo en la galaxia. [Reproducido con permiso de Astrophysical Journal *137, 1005* (1963), de C. R. Lynds y A. R. Sandage.]

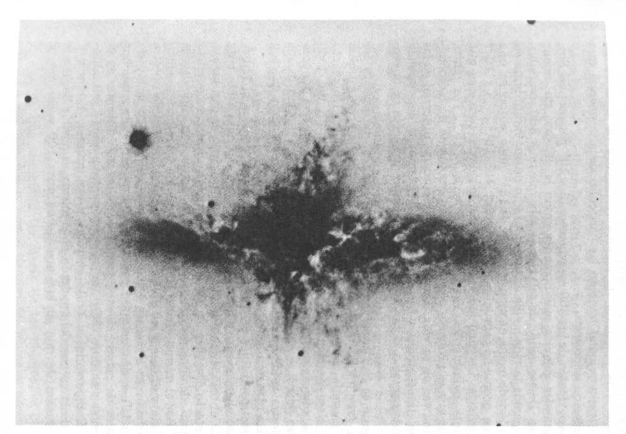


Figura 9-5b. Fotografía de M82, la misma galaxia de la figura 9-5a, pero observada en este caso con la luz de emisión del hidrógeno. La enorme cantidad de materia que sale hacia arriba del plano de la galaxia indica la existencia de una gran explosión en ella. La turbulencia que se extiende por toda la galaxia y los penachos más débiles en otras direcciones, sugieren explosiones previas. [Reproducido con permiso de Astrophysical Journal, *137, 1005* (1963), de C. R. Lynds y A. R. Sandage.]

comprendidos entre 10^4 y 10^7 años. Hay razón para sospechar que los acontecimientos están relacionados entre sí, es decir, que los violentos sucesos que llevan a la expulsión de grandes cantidades de materia del núcleo galáctico, proporcionan también las partículas de alta energía que conducen a la radiación sincrotrón.

≪ Ahora bien, dentro de los 300 megaparsecs (3×10^8 parsecs) del Sol, hay unas 10^6 grandes galaxias más o menos como la nuestra, sin incluir las galaxias enanas. De ese millón de galaxias, se sabe que unas 300 son radiofuentes. Establezcamos la vida media de emisión radio de una radiofuente en 3×10^6 años. Si la vida media de una galaxia es de 10^{10} años, entonces, una explosión dura en promedio, aproximadamente $3 \times 10^6/10^{10} = 3 \times 10^{-4}$ de la vida de la galaxia. De igual modo, la fracción de galaxias próximas que son corrientemente radiofuentes, es de $300/10^6 = 3 \times 10^{-4}$. Por tanto, podemos concluir que es probable que toda galaxia sea fuente de radioemisión, al menos una vez en su vida. Esos sucesos violentos se observan en las galaxias elípticas, las espirales y las irregulares. Ignoramos si desempeñan una función fundamental o si tan sólo son accidentes pasajeros de la evolución galáctica. ≫

Recientemente se han observado objetos interesantes que pueden ser radiogalaxias en fase inicial de formación. Al telescopio parecen estrellas ordinarias ≪ y durante muchos años se les tuvo como tales. Un objeto típico de esta clase podría ser de decimoséptima magnitud, del todo humilde. Y como además son fuentes intensas de radiación, se han denominado radiofuentes "cuasi estelares" o, quasars (1). El propio nombre es una confesión de nuestra ignorancia. Es probable que cuando sepamos qué son en realidad reciban otro nombre. ≫

En sus espectros visibles se observan intensas rayas debidas al hidrógeno, al oxígeno, al magnesio y a otros elementos y todas ellas están muy desplazadas hacia el rojo. Dicho desplazamiento hacia el rojo es casi seguro que se debe al efecto Doppler; ≪ todos los intentos hechos para explicar ese desplazamiento de longitud de onda han tropezado con dificultades insuperables. ≫ Por el mismo efecto Doppler se pueden calcular sus velocidades, que resultan enormes y en todas direcciones, alejándose de nuestra Galaxia. A partir de esas inmensas velocidades de recesión y de la ley de Hubble (capítulo 10) se deduce que las radiofuentes quasars están a muchos cientos de millones de parsecs de nosotros. Una de las más distantes en el momento de escribir este libro, 3C-9, quizá se encuentra a unos 3 mil millones de parsecs. Comparando su brillo aparente a esa inmensa distancia y aplicando la ley de la inversa del cuadrado de la misma, es posible llegar a la importante conclusión de que su luminosidad es unas 100 veces mayor

1. - N. del T. - Quasar, contracción inglesa de *quasi star* (casi estrella). Cabe distinguir entre *radiofuente quasar*, símbolo QSS y *galaxia quasar*, símbolo QSG.

que la de la más intensa galaxia conocida. Parece posible que la radiación óptica, al igual que la de radioondas, esté producida por emisión sincrotrón.

La característica más sorprendente de las radiofuentes quasars es, sin embargo, que su radiación a las frecuencias visibles varía con el tiempo. Se sabe que las distintas estrellas de una galaxia son variables, ≪ pero la variación "en la producción" de luz de toda una galaxia en un período de años, o aun de meses, no tiene precedentes y al principio, efectivamente, parece imposible. ¿Cómo puede llegar a sincronizarse la producción de luz de millones de estrellas? La mayor velocidad a que puede transmitirse información es a la de la luz. Si un núcleo galáctico tiene un diámetro de 3000 años luz, para ir de un lado al otro del mismo, la información tarda al menos 3000 años y únicamente, si el tamaño real de una radiofuente quasar es menor que un año luz existe entonces la esperanza de comprender las variaciones de luminosidad, si es que los quasars son los núcleos de galaxias remotas. ≫

Si las radiofuentes cuasi estelares son efectivamente las fases iniciales de las explosiones galácticas, entonces la escala de tiempo de esa primitiva fase escasamente podría ser superior a unos miles de años. Las radiogalaxias 3C-295 y Cygnus A son más viejas que eso. Las partículas que viajando casi a la velocidad de la luz y que surgieron de sus explosiones iniciales, han rebasado los límites de sus galaxias respectivas y formado dos nubes simétricas alrededor de ellas, que se detectan por su emisión de radioondas. La 3C-295 tiene varias decenas de miles de años; Cygnus A, cientos de miles de años y ambas, al igual que otras como Centaurus A, están todavía en estado de desarrollo.

¿Qué pudo causar esas explosiones? El astrofísico angloamericano Geoffrey Burbidge, cree que el factor inicial pudo ser la reacción en cadena de una supernova. (Véase el capítulo 7.) Otros investigadores, por ejemplo, el astrónomo británico Fred Hoyle, de la Universidad de Cambridge, y yo, opinamos que tuvo lugar la explosión de un cuerpo inmenso, inestable, parecido a una estrella, con una masa al menos millones de veces mayor que la del Sol.

≪ ¿Podría ser estable un objeto con esa masa? Se creía –al menos hasta hace poco– que ninguna estrella con una masa que excediera como 100 veces a la del Sol podía ser estable. En realidad, el astrónomo británico Sir Arthur Stanley Eddington, sugirió una vez que los hipotéticos habitantes de un planeta rodeado de nubes –digamos Venus– podrían deducir la existencia y masa de estrellas parcialmente a partir de este hecho, haciendo uso únicamente de la física, sin nada de astronomía. Consideremos objetos de masas progresivamente mayores. Comencemos por un objeto de tan sólo un gramo. A medida que aumentan las masas de los objetos, es claro que igual les sucede a sus tamaños y, con el tiempo, las masas se hacen tan grandes que los efectos de la gravedad resultan importantes y que los interiores de esos

cuerpos se comprimen a causa de las elevadas presiones. Siguen creciendo las masas y llegamos y rebasamos a las masas planetarias características. Pronto, debido a la liberación de energía potencial gravitatoria, pues estamos haciendo masas cada vez mayores, las temperaturas superficiales de nuestros objetos se elevan tanto, que resplandecen y lentamente irradian energía al espacio. En el momento que las masas alcanzan unos 10^{32} gramos, dice Eddington, esos objetos podrían brillar lo suficiente para verlos en ausencia de nubes y se "encendería la luz" de unas estrellas. Sabemos ya que a masas un poco mayores, empezarían reacciones termonucleares en el interior de esos cuerpos y que, efectivamente, tendríamos estrellas.

≪ Cuando la masa de una estrella aumenta hacia los 10^{35} g, aparece en escena un fenómeno nuevo: la presión de radiación. Al reflejarse en una pared o en cualquier otro objeto, la luz ejerce una presión, aunque normalmente es tan pequeña, por la poca intensidad de la luz, que no la apreciamos en nuestra vida corriente.

Cuando la intensidad de la radiación aumenta, la presión se hace cada vez más importante. En una estrella con una masa de unos 10^{35} g, la presión de radiación ejercida por el interior caliente sobre el exterior más frío resulta enorme y aquéllas de mucha más masa pueden hincharse por la presión de radiación.

Además de demostrar la existencia de estrellas a los sofisticados habitantes de planetas rodeados por nubes, resulta de este argumento que no es probable que pueda haber estrellas cuyas masas sean muchos millones de veces la de nuestro Sol.

≪ En cambio, las quasars han de tener alguna fuente de energía. La quasar 3C-273 emite un total de energía a todas las frecuencias de, aproximadamente, 10^{54} erg por año. Si tomamos su vida como la de otra radiofuente –digamos 10^{5} años– entonces su producción total de energía en el transcurso de su vida resulta de 10^{59} erg. Sólo hay dos tipos generales de fuentes de energía capaces de suministrar esa cantidad y son, la nuclear y la gravitacional. El Sol, que está quemando su combustible nuclear con un rendimiento de un uno por ciento, tiene una luminosidad de 4×10^{33} erg por segundo; por lo tanto, en su vida de 10^{10} años emitirá 4×10^{33} erg $s^{-1} \times 10^{10}$ años $\times 3 \times 10^{7}$ s año^{-1} = 10^{51} erg, aproximadamente. Una quasar, desarrollando energía nuclear igual que el Sol, necesitaría una masa de 10^{59} erg/10^{51} erg sol^{-1} = 10^{8} soles. Si una quasar fuera capaz de la conversión completa de masa en energía, por la ecuación $E = mc^2$, su rendimiento sería del 100% y su masa total sólo de 10^{6} soles.

≪ Por otra parte, si la energía viene suministrada por el colapso gravitacional de una gran nube, haría falta una masa todavía mayor que la de 10^{9} soles. Así pues, cualquiera que sea la fuente de energía, las quasars han de ser extremadamente masivas y con todo, debido a la variación de la luz que producen, parece poco probable que sus dimensiones extremas sean mucho mayores que unos cuantos meses luz. Las quasars tienen que ser objetos muy

masivos en volúmenes muy pequeños, es decir, objetos de gran densidad. A causa de las dificultades a que ya hemos aludido para la comprensión de la estabilidad de un objeto así, algunos astrónomos creen que las quasars no son intrínsicamente como estrellas y que no están animadas por energía nuclear sino más bien por la de un vasto colapso gravitacional. La masa necesaria, de unos 10^{9} soles, es menor que el uno por ciento de la masa total de una galaxia clásica y un lugar apropiado para que se produzca un colapso de esas dimensiones, es el núcleo de una galaxia, donde efectivamente se han observado directamente acontecimientos violentos. (Véase la figura 9-5b.)

≪ Quizá, durante la formación de una galaxia, mucha de la materia que no se condensa fuera en polvo y estrellas se precipita al núcleo galáctico y como la masa total de la materia que se colapsa es tan grande, la presión del material subyacente –como en el caso de la evolución de las gigantes rojas– es incapaz de soportar la de las capas exteriores y la masa continúa contrayéndose convirtiendo cada vez más energía potencial gravitatoria en energía cinética y llega un momento en el que se ha producido tal cantidad de energía cinética, que el colapso retrocede, la implosión se convierte en explosión y decimos que eso es una quasar. Tras la explosión de una quasar, puede continuar cayendo otra materia de la galaxia en el núcleo y proseguir una serie de colapsos y explosiones de magnitud decreciente gradualmente. En el caso concreto de la galaxia M82 (figura 9-5) hay algo de evidencia de más de una explosión. Una quasar sería entonces simplemente un ejemplo más violento de la clase de explosiones que previamente hemos observado en las galaxias próximas.

≪ El estudio de las quasars ha generado otra especulación interesante. Tal como veremos en el capítulo siguiente, cuando la densidad de la materia es muy grande, desvía de su trayectoria rectilínea a un rayo de luz que pase cerca de ella y cuanto mayor sea aquella, hace que mayor sea la curvatura de la trayectoria de la luz. Cuando la densidad alcanza cierto valor crítico, distinto para distintas masas, el rayo de luz se curva hasta tal extremo, que podría considerársele en una órbita circular alrededor de la densa masa. A tal densidad, la radiación emitida por el objeto es incapaz de escapar al espacio; en vez de eso, queda ligada al objeto gravitacionalmente. Para una masa determinada, el radio de un objeto que presente este comportamiento, se llama radio de Schwarzschild (2) en honor del astrónomo alemán Karl Schwarzschild, de la Universidad de Göttingen.

2. - N. del T. - El radio de Schwartzschild R, viene dado por la siguiente ecuación, supuesto el objeto perfectamente esférico: $R = 2mgc^{-2}$ siendo m la masa del objeto, g la constante gravitatoria y c la velocidad de la luz. A nuestro Sol le correspondería un radio de Schwartzschild de 2,9 km

Ahora bien, aunque un objeto con radio menor que el de Schwarzschild no se puede ver, sí puede sentirse la influencia de su gravedad. Se ha postulado que las quasars son objetos de densidad inmensa que oscilan entre dos radios, uno mayor que el de Schwarzschild y otro menor. Puesto que no hay modo de comunicarse con un objeto de radio menor que de Schwarzschild, ni se puede tampoco recibir información de él, podría decirse que un objeto que oscila así, entra y sale periódicamente del universo. Sin embargo, el astrónomo indio-americano Subrahmānyan Chandrasekhar, de la Universidad de Chicago, ha demostrado que ya bastante antes de llegar al radio de Schwarzschild se presentan otras inestabilidades en un objeto que se esté contrayendo; inestabilidades que tienden a invertir el colapso y producir una explosión. Las quasars pueden ser objetos extravagantes, pero sin llegar al extremo de aquéllos con radio menor que el de Schwarzschild.

≪ El astrofísico americano Lyman Spitzer, de la Universidad de Princeton, Thomas Gold y el físico holandés-americano L. Woltjer, de la Universidad de Columbia, entre otros, han sugerido para las quasars una fuente de energía un poco menos extraña: la atribuyen a frecuentes y violentas colisiones de estrellas en los núcleos de las galaxias. Por ejemplo, en el centro de la M31 existe un núcleo con una luminosidad tan brillante como la de 10^8 soles y, sin embargo, su diámetro es menor que 5 parsecs. La densidad media estelar en éste y otros núcleos galácticos es como mínimo de 10^5 a 10^6 estrellas por parsec cúbico y la distancia media correspondiente entre estrellas en tales núcleos es de unas pocas centésimas de parsec o de unos miles de unidades astronómicas. Si ocasionalmente hay núcleos galácticos en los que la densidad estelar es sustancialmente mayor y la distancia media entre estrellas es de decenas de unidades astronómicas, entonces, las colisiones entre estrellas tendrán lugar a una frecuencia que bastará para proporcionar las producciones de energía observadas y las vidas calculadas de las quasars. En esos núcleos galácticos, la distancia media entre las estrellas sería comparable a la que hay entre la Tierra y Saturno. En la versión de Spitzer de esta teoría, en cada colisión se separa una fracción de la masa gaseosa de cada estrella, que se enfría, se precipita hacia el centro del núcleo galáctico y allí se condensa para volver a formar estrellas, que a su vez pierden las masas en las colisiones respectivas. Este modelo de colisión estelar para las quasars, no recurre a ningún principio nuevo de física; sólo exige unas densidades a las estrellas del núcleo galáctico que todavía no se han observado.

≪ El estudio de las quasars tan sólo ha comenzado, pero no hay duda que representan un episodio muy significativo de la evolución galáctica. ≫

La distribución de las radiogalaxias quizá sea ajena a la cuestión de la vida en el universo. Por ejemplo, en el sistema estelar gigante Cygnus A, el nivel de radiación ionizante severa, es cientos de miles de veces más intensa que en la superficie de la Tierra y no es posible que las formas de vida superiores puedan vivir mucho tiempo expuestas a tales intensidades de radiación. Si las radiogalaxias como la Cygnus A son viejas, es posible que las explosiones galácticas en los núcleos de los sistemas estelares viejos

puedan haber destruido la vida que hubiera evolucionado antes de la explosión. ≪ Los fenómenos que suceden en el interior de una galaxia pueden destruir la vida de millones de planetas distribuidos por toda la galaxia. ≫ Si en algún momento del pasado tuvo lugar una explosión menor de este tipo en el núcleo de nuestra Galaxia, aparentemente no constituyó un riesgo insuperable para el desarrollo de la vida en la Tierra. ≪ Sin embargo, nadie puede predecir la probabilidad de que ocurra una explosión en el centro de nuestra Galaxia en algún instante futuro. ≫

10

Cosmología

¿Quién lo sabe de seguro? ¿Quién lo declara aquí?
¿Cuándo nació, cuándo llegó la creación?
Los dioses llegaron después de la formación de este mundo:
¿Quién puede pues saber los orígenes del mundo?
Nadie sabe cuando surgió la creación,
ni si fue o no fue creada;
El, que vigila desde los altísimos cielos,
sólo El lo sabe – o quizá no lo sabe.

Rigveda, (1) X, 129

1.– N. del T. Uno de los cuatro tomos de la filosofía sagrada brahamánica, dedicado a la cosmogonía, alrededor de 1550 a 800 a. J. C.

El pensamiento humano es ilimitado. Los científicos han estudiado el origen de los elementos, las estrellas y las galaxias, como hemos visto en los capítulos precedentes. ¿Pero cuál es el origen de la nube de gas inicial a partir de la cual se formaron las galaxias?

En este capítulo nos encontramos frente a frente con la cuestión más trascendental de las ciencias naturales contemporáneas: el problema cosmológico. La cosmología se define como el estudio de la estructura y desarrollo del universo como un todo. Llega a la raiz de profundos problemas científicos y filosóficos. ≪ ¿Es el universo finito o infinito? ¿Es eterno o tiene un principio finito en el tiempo? Si fue creado en un instante de tiempo ¿cómo se consiguió? Si el infinito es eternamente viejo ¿tiene algún propósito en algún sentido? ¿Son las leyes físicas inmutables o se alteran con el tiempo? ¿Qué es lo que determina las leyes físicas? ¿Tiene el universo el mismo aspecto en todos los lugares y épocas? ¿Qué forma tiene? ¿Por qué parece que las galaxias se escapan unas de otras? ¿Existe una conversión irreversible total del hidrógeno en elementos pesados? Los cosmólogos se enfrentan con muchos de estos problemas; quizá con el tiempo, lleguen a resolverse.

≪El cielo es oscuro por la noche. Esta observación aparentemente trivial es de profundas consecuencias cosmológicas. ¿Por qué es oscuro por la noche? Porque no brilla. ¿Por qué no brilla? Porque no hay suficientes estrellas lo bastante juntas para hacer que el cielo brille por la noche. Consideremos el siguiente argumento geométrico. En el centro de la figura 10-1 vemos nuestra galaxia rodeada por dos capas esféricas imaginarias de radios R_1 y R_2, el espesor s de cada capa es mucho menor que cualquiera de los radios R_1 y R_2. Consideremos que la capa interna tiene un área aproximadamente igual a $4\pi R_1^2$; la superficie externa de esa misma capa también tiene un área aproximadamente igual a $4\pi R_1^2$, puesto que su espesor es despreciable. Por lo tanto, el volumen de la capa esférica es $4\pi R_1^2 s$.

Supongamos ahora que el espacio está ocupado uniformemente por galaxias. Representemos la densidad espacial de galaxias por N, o sea el número de galaxias por unidad de volumen espacial —por ejemplo, un megaparsec cúbico. Un megaparsec es un millón de parsecs: un megaparsec cúbico es, claro está, un cubo cuya arista mide un millón de parsecs. Llamemos L a la luminosidad absoluta promedio por galaxia. Así N, número de galaxias por unidad de volumen multiplicada por L, luminosidad por galaxia, es NL, igual a la luminosidad emitida por todas las galaxias dentro de la unidad de volumen del espacio. La luminosidad absoluta de la capa esférica más interna es, por tanto, $NL4\pi R_1^2$. Y por razonamiento análogo la luminosidad absoluta de la capa

exterior, cuyo radio es R_2, es $NL4\pi R_2^2 s$, puesto que hemos supuesto que el espesor s era igual para las dos. Como R_2 es mayor que R_1, el volumen de la capa exterior es mayor que el de la interior; hay pues más galaxias en aquella y tiene una luminosidad intrínseca mayor ¡Pero está más lejos! Y la luz procedente de un objeto lejano se atenúa en razón inversa al cuadrado de su distancia. Luego, si bien una capa esférica distante tiene un número mayor de galaxias, proporcional a R^2 que una capa próxima, la luminosidad de aquellas galaxias se reduce por el mismo factor R^2. De aquí, que cualquier capa esférica, cualquiera que sea su lugar en el universo, aporta la misma luminosidad *aparente* vista desde la Tierra.

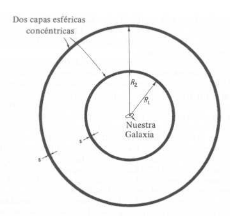


Figura 10-1. Vista en corte de dos capas esféricas concéntricas de igual espesor. La distancia de nuestra Galaxia a esas dos capas imaginarias tendría que considerarse, como mínimo, de millones de parsecs.

≪Es claro que el razonamiento es válido en tanto que lo sean nuestras suposiciones; en particular, si la distribución de todas las galaxias por el universo es constante y si la luminosidad por galaxia no cambia sistemáticamente con la distancia a la Tierra. Si cada *capa* esférica contribuye con una luminosidad aparente £, diez capas contribuirán con una luminosidad aparente 10£ y así sucesivamente. Luego, si el universo es infinito, de modo que haya infinitas capas, la luz del cielo nocturno tendría que ser infinitamente brillante y, en cambio, la realidad no confirma esta predicción. La contradicción entre teoría y observación se conoce con el nombre de paradoja de Olbers (2).

≪En realidad, no podemos esperar que el cielo por la noche sea infinitamente brillante, aunque la extensión del universo sea infinita, puesto que a medida que aumentáramos cada vez capas a mayor distancia, llegaríamos a un punto en el cual las galaxias próximas a él bloquearían la luz de las más distantes. La mayor cantidad de luz que podría llegar a la Tierra tendría lugar cuando en cualquier dirección que mirásemos se tropezara nuestra visual con una estrella. Veríamos entonces un cielo iluminado uniformemente por una inmensa población galáctica sin hueco entre estrellas. El cielo estaría radiando a la Tierra a la temperatura superficial media estelar — digamos 5000 K. A modo de comparación, nos podemos imaginar a la Tierra (y a nuestro sistema solar y Galaxia) colocados dentro de un horno enorme a la temperatura de 5000 K. En tal caso, pronto alcanzaría la Tierra también los 5000 K y resultaría imposible la vida. Así pues, la existencia de vida en la Tierra, se debe en parte a la solución de la paradoja de Olbers.

≪Exploremos algunas soluciones pretendidas para la paradoja de Olbers. En primer lugar, hay polvo ¿Habría polvo suficiente y otros materiales absorbentes en el espacio intergaláctico para poder absorber toda la luz procedente de los objetos más remotos? Esto es equivalente a decir que la luminosidad L por galaxia, de la ecuación anterior, no es igual para cada capa esférica. Y esto no resuelve la paradoja de Olbers puesto que los granos de polvo se calentarían por la luz estelar y como tales objetos calientes reemitirían radiación. En el equilibrio, estarían a la misma temperatura que las estrellas.

≪Supongamos ahora que la densidad espacial de galaxias N disminuye con la distancia. Como ya se citó en el capítulo 9, las galaxias están, aparentemente, distribuidas en orden jerárquico, es decir, que la densidad media de galaxias en el universo parece decrecer con sus distancias a la Tierra, si consideramos distancias muy grandes. Sin embargo, minuciosamente, la solución jerárquica discrepa de las observaciones.

≪Quizá pudieramos añadir solamente un número finito de capas esféricas y pararnos. Si nos paramos demasiado pronto, habría regiones del cielo en las cuales desde la Tierra no habría galaxias visibles. Luego, la paradoja de Olbers se puede resolver si postulamos que es finita la cantidad de materia del universo. Volveremos más adelante, en este mismo capítulo, a explorar con más detalle esta posibilidad.

≪Finalmente, podemos resolver la paradoja poniendo en vez de un límite al espacio, un principio del tiempo. Recordemos que la luz se propaga a la

2.– N. del T. Heinrich Wilhelm Mathias Olbers (1758 - 1840). Astrónomo alemán dedicado principalmente al estudio de los cometas y los asteroides. Descubrió Pallas, Vesta y seis cometas, uno de los cuales lleva su nombre. Dio el primer método práctico para determinar las órbitas de los cometas. Como nota curiosa, digamos que la astronomía era su afición, pues de profesión era Doctor en Medicina.

velocidad finita $c = 300000 \text{ km s}^{-1}$. Así pues, cuando contemplamos las galaxias más distantes estamos viendo épocas que se remontan más y más al pasado. Si el universo empezó en un instante finito del tiempo, acabaríamos llegando a ver a grandes distancias un punto en el espacio correspondiente al momento del origen del universo, más allá del cual, como es natural, no habría galaxias. Esto es una solución posible a la paradoja de Olbers, pero contraría a mucha gente. Para este resultado viene al caso un cuento apócrifo que relata la vida de San Agustín , que dice estaba el santo hablando de los mismos temas que tratamos en este capítulo pero, como es lógico, dentro de la estructura conceptual de su época, tal como lo es ahora la nuestra por los conceptos que nos rigen, y que un miembro del auditorio le objetó: — Veamos, Agustín. Nos has dicho que al principio Dios creó los cielos y la Tierra. También nos has dicho que Dios es eterno, que no tiene principio ni fin. ¿Qué hacía pues Dios antes de crear los cielos y la Tierra? — Y que San Agustín le respondió: — Estaba creando el Infierno para los que hacen preguntas como esa —.

≪Es importante recordar qué es infinito. No es simplemente un número grande. No hay un número infinito de granos de arena en la playa, ni infinitas combinaciones en ningún juego. En ambos casos se trata de números muy grandes, pero no infinitos. Para poner en evidencia cuán grande pueden ser los números sin llegar siquiera a aproximarse a infinito, el sobrino de 8 años del matemático americano Edward Kasner, llama *googol* al número 10^{100} que puede escribirse como 1 seguido de cien ceros y que es mayor que el número de partículas elementales conocidas del universo, es decir, de partículas hasta una distancia de unos cuantos miles de millones de años luz. Un número todavía mayor y ni con mucho próximo a infinito, es el *googolplex*, que es $10^{\text{googol}} = 10^{10^{100}}$. Aunque fuera algo menor, un googolplex es tan grande, que simplemente el escribir sus ceros en notación decimal ordinaria, ocuparía mucho más tiempo que la vida de una persona. Y con todo, no es infinito. A pesar de ello, en este capítulo nos ocupamos de si el universo es *infinitamente* grande, de si contiene una cantidad *infinita* de materia, de si es *infinitamente* viejo y de si hay esperanza de que su vida futura sea *infinita*.

≪ A mayor abundamiento de números grandes, calculemos el número de partículas elementales — protones y electrones — que hay en el universo observable. Hemos mencionado que nuestro Sol tiene una masa de unos 2×10^{33} g. La masa del átomo de hidrógeno es de $1{,}66 \times 10^{-24}$ g. Si decimos que está el Sol constituido exclusivamente por hidrógeno, cosa que no está muy lejos de la realidad, contiene entonces 10^{57} átomos de hidrógeno y más o menos el mismo número de electrones, en nuestra Galaxia hay como 10^{11} estrellas; por lo tanto, el número de protones y electrones en ella es, más o menos, de 2×10^{68}. Dentro del alcance del telescopio de 200 pulgadas de Monte Palomar, por lo menos hay otras 10^9 galaxias, que dan 2×10^{77} partículas elementales. Con un margen generoso por la cantidad de materia interestelar e intergaláctica y por las posibles galaxias sin descubrir hasta una distancia extrema de tanto como 10000 millones de años luz, encontramos que el número de partículas elementales en el universo observable no pasa de las 10^{80} cantidad que es cien millones de millones de millones menor que un googol. ($100 \times 10^6 \times 10^6 \times 10^6 = 10^{20}$ = diferencia entre 10^{100} y $10^{80} = 100 \times \times 10^{18}$ = 100 trillones.)

Con 10^{11} estrellas en nuestra Galaxia y 10^9 en las demás, en el universo hay por lo menos 10^{20} estrellas; la mayoría de las cuales, como veremos en los próximos capítulos, pueden ir acompañadas de sistemas planetarios como el solar. Si en el universo hay 10^{20} sistemas solares y aquel tiene 10^{10} años de antigüedad y si además los mencionados sistemas se han ido formando andando el tiempo de modo más o menos uniforme, resulta que cada 10^{-10} años se ha formado un sistema, lo que equivale a cada 3×10^{-3} segundos que da, en resumen, que en el universo se formen un millón de sistemas solares cada hora. ≫

≪ Volvamos ahora a la paradoja de Olbers, pero consideremos primero la cuestión de la configuración general del universo. La hipótesis más simple y natural, es que es tridimensional y euclídeo, es decir, que la posición de cualquier punto puede darse por sus tres coordenadas y que se aplican los conocidos axiomas de la geometría de Euclides a la medición de la distancia. Y si bien la sencillez es de valor heurístico, nada obliga o precisa a que el universo sea sencillo. Sin embargo, lo que es difícil para una generación de científicos, es fácil para la siguiente.

≪ En el primero y segundo decenios de este siglo Albert Einstein postuló que vivimos en un universo cuatridimensional en el cual el tiempo (o más bien el producto de la velocidad de la luz por el tiempo, para que concuerden las unidades) está en el mismo referencial que las coordenadas espaciales ordinarias. En lugar de hablar de puntos en el espacio, tenemos que hablar de acontecimientos en el continuo cuatridimensional espacio-tiempo; al menos, así parece lógico. Es claro que no podemos representar materialmente cuatro dimensiones — largo, ancho, alto y alguna otra cosa a ángulos rectos a las tres primeras. Pero matemáticamente, las cuatro dimensiones se pueden manejar casi con la misma sencillez que tres. Si el continuo espacio-tiempo cuatridimensional fuera plano o euclídeo, sería muy fácil trabajar en él. Por ejemplo, si el lado de un cuadrado tiene una longitud a, el área del cuadrado es a^2; un cubo de arista a, tiene un volumen a^3. Al objeto cuatridimensional correspondiente cuyos lados tienen todos una longitud a, se le llama hipercubo, o *tesseract* en los países sajones. Su "capacidad" es igual a a^4. (Es claro que en el lenguaje corriente actual no hay ninguna palabra equivalente al cubo para el volumen cuatridimensional.)

≪ Comparando el área del círculo, πr^2, con el volumen de la esfera, $4/3\ \pi r^3$, vemos inmediatamente que las relaciones geométricas en el espacio cuatridimensional no euclídeo han de resultar complicadas. Einstein postuló que la estructura geométrica del espacio-tiempo en presencia de materia no es euclídea, sino curva (3), y que por tanto no se puede aplicar la geometría

3.— N. del T. Teoría de la relatividad general.

euclidiana ni al movimiento de objetos materiales ni al de la luz. En la teoría de la relatividad general, Einstein hizo predicciones numéricas concretas de, por ejemplo, la desviación de la luz de las estrellas al pasar cerca del Sol (sólo fácilmente visible, claro está, durante un eclipse total de Sol) y de las anomalías en la orbita de Mercurio, el planeta más próximo al Sol.

⩽ Estas brillantes predicciones se han confirmado, en parte, por la observación y la mayoría de los físicos concuerdan en que el espacio-tiempo es curvo. Sin embargo, las dificultades observacionales para realizar las comprobaciones y el hecho de que algunas de ellas no prueban del todo la teoría de la relatividad general, dejan cierto margen para el escepticismo. El físico americano Irwin I. Shapiro, del Instituto Tecnológico de Massachusets, ha propuesto un medio nuevo para comprobar la relatividad general. Recomienda que se transmitan señales de radar a Venus o Mercurio cuando estos planetas están al lado opuesto del Sol que la Tierra, en cuyo momento, los pulsos de radar han de pasar cerca del Sol para llegar al planeta. De acuerdo con la relatividad general, la trayectoria de los pulsos de radar se desviará hacia el Sol y, según Shapiro, el retraso resultante en la captación del eco será del orden de 2×10^{-4} segundos. Este tiempo tan extraordinariamente corto, se puede medir con los aparatos existentes y es probable que en el futuro inmediato se lleve a cabo esta prueba crucial de la relatividad general.

⩽ Habiendo predicho con buen resultado el comportamiento del espacio-tiempo en la vecindad de un objeto material simple, tal como el Sol, Einstein pasó a considerarlo en el universo como un todo. Suponiendo una distribución uniforme de las galaxias, dedujo Einstein en su incursión cosmológica inicial, un universo cerrado de curvatura "positiva". Su análogo tridimensional sería la esfera. Consideremos un organismo bidimensional andando dentro de una esfera hueca: vería que si bien no había obstáculos en su camino, la cantidad de espacio bidimensional disponible para su peregrinación sería limitada. La razón, evidentemente, es que el área bidimensional de la esfera, $4\pi r^2$ (siendo r el radio de la esfera) está hábilmente envuelta por una tercera dimensión, de modo que carece de bordes. De manera análoga, Einstein imaginó que las tres dimensiones materiales ordinarias están cerradas, por lo cual, si pudiéramos recorrer distancias inmensas sobre lo que entendemos por línea recta, sin retroceder ni encontrar un límite en el camino, regresaríamos al punto de partida. Sería posible circunnavegar un universo cerrado.

⩽ En los años 1920, cuando se creía que el universo era cerrado y el radio de curvatura modesto según las pautas actuales, algunos astrónomos dieron vuelta al telescopio explorando en el cielo en dirección contraria a la de nuestra galaxia espiral más próxima, la M31 (figura 3-5). Allí, de seguro había otra galaxia espiral de forma semejante y surgió la posibilidad emocionante de que fuera M31 vista desde el otro lado. En realidad, más allá de M31 tendría que haber otra galaxia espiral, la propia nuestra. Si la velocidad de la luz fuera infinitamente rápida y si los telescopios tuvieran un poder de resolución infinito, los astrónomos podrían retratar las coronillas de sus cabezas orientando

simplemente el telescopio al espacio. Quizá por fortuna, son imposibles tales observaciones.

⩽ Einstein también halló con sus modelos cosmológicos primitivos, que a menos que hiciera otras hipótesis, resultaba imposible el universo estático. Parecía que un universo cerrado tendía a contraerse debido a la atracción gravitacional de la materia contenida en él. También se fundamentaron modelos en los que el universo se expandía. Dado que en aquel tiempo nadie creía que el universo por sí mismo sufriera ningún movimiento neto, Einstein, para evitar o evadir esta dificultad, introdujo una fuerza nueva de repulsión cósmica. Era tan débil a pequeñas distancias que nadie la podía medir y tan grande a distancias enormes, que sostenía al universo haciéndolo estable contra la contracción.

⩽ Pero casi tan pronto como se formulaban estos universos modelo, las observaciones astronómicas los desmentían haciendo que quedaran anticuados. A principios de los años 1920, el astrónomo americano Edwin Hubble, del Observatorio de Monte Wilson, dedujo la distancia de estas galaxias a la Tierra. Resultaron no ser sistemas solares de nuestra propia Galaxia en proceso de formación, como se había supuesto previamente, sino galaxias independientes, como la nuestra o, como se decía en aquellos días, "universos islas". (Por definición, no puede haber más que un universo y por eso ahora las llamamos galaxias.) Empleando con buen resultado las denominadas variables Cefeidas, estrellas de brillo O y B, asociaciones de estrellas de brillo O y B y todas las estrellas juntas de la galaxia, como indicadoras de luminosidad absoluta, fue posible comparar las luminosidades absoluta y aparente y deducir incluso las distancias de galaxias verdaderamente remotas.

Hacia esa misma época, V. M. Slipher descubrió que las rayas del espectro de las galaxias que están más allá del grupo local se desplazaban hacia el rojo. Relacionando entre sí estas observaciones, Hubble descubrió que el desplazamiento hacia el rojo y la distancia a la Tierra de una galaxia dada guardaban relación entre sí; cuanto más alejada está la galaxia, mayor es el desplazamiento hacia el rojo. La única interpretación del desplazamiento que ha superado la prueba del tiempo es el efecto Doppler expuesto en el capítulo 3. Hay que deducir, pues, que excepto para las galaxias próximas cuyos movimientos al azar ocultan el efecto, cuanto más alejada de nosotros está una galaxia, más rápida es la velocidad a que se nos separa, lo cual puede expresarse por la ecuación $V=Hr$ en la que V es la velocidad de recesión, r la distancia a la galaxia y H la constante de proporcionalidad, conocida como constante de Hubble, por su descubrimiento de esta relación lineal. Es decir, la velocidad de recesión de una galaxia es proporcional a la distancia a que se encuentra de nosotros.

Los cálculos actuales sitúan el valor de la constante de Hubble entre 75 y 100 km s^{-1} por megaparsec, o sea que por cada megaparsec de distancia a una galaxia, hemos de añadir un incremento de unos 100 km s^{-1} a su velocidad de recesión.

⩽ ¿Pero qué significa esto? ¿Se están escapando de nosotros todas las ga-

laxias? ¿Por qué se nos escapan? ¿Estamos nosotros en el centro del universo? Las observaciones astronómicas generales demuestran que no hay nada único en nuestro rincón particular del universo. Los primeros hombres descubrieron que la Tierra no era el centro del universo; que en vez del Sol moviéndose alrededor de la Tierra, era ésta la que giraba alrededor de aquél. Luego se halló, a partir de la distribución de los cúmulos globulares, que nuestro Sol no era el centro de la Galaxia, sino que más bien estaba en una posición humilde cerca del borde. ¿Y hemos de encontrar ahora que nuestra Galaxia, una de las por lo menos 10^9 que hay, resulta que está en el centro del Universo?

⩽ No, si es que el universo como un todo está en expansión. Hagamos uso de la siguiente analogía. Imaginemos que el universo es un pastel de pasas sin cocer. (Peores analogías se han hecho.) Cada pasa representa una galaxia. Se mete el pastel en el horno y al cabo de un rato sube. El volumen del pastel ha aumentado —el "universo" se ha expandido— y además ha habido un aumento en la separación de una a otra pasa. Si estuviéramos en una de ellas y viéramos a las demás, nos parecería que todas se alejaban de nosotros y que las más distantes eran las que lo hacían más deprisa y esta observación sería igual desde cualquier pasa en que estuviéramos. Del mismo modo, si nuestro universo se está expansionando, algo similar a la ley de Hubble verían los astrónomos desde cualquiera de las más de 10^9 galaxias.

⩽ Conformes, muy bien, el universo se está expansionando y no hay nada especial respecto a nuestra posición en él. Pero hay que concluir que en el pasado todas las galaxias estaban más cerca.⩾ Si la velocidad de expansión aumenta a razón de 75 ó 100 km s^{-1} cada millón de parsecs, extrapolando al pasado, llegamos al sorprendente resultado de que hace, aproximadamente 12 mil millones de años, ⩽más o menos, $1/H$ ⩾ todo el universo estaba concentrado en un volumen extremadamente pequeño. Algunos científicos creen que entonces la densidad era superior a 10^{14} o 10^{15} g cm^{-3}; que la densidad del universo era, pues, mayor que la del núcleo atómico. Dicho de otro modo, el universo era una " gota" nuclear, superdensa, gigante. Por alguna razón la gota perdió su estabilidad, explotó, y sus resultados se observan ahora como universo en expansión. ⩽ Esta cosmogonía se conoce como hipótesis evolutiva o del "big bang" (de la gran explosión).

⩽ Pero no es necesario concluir que el universo fue *creado* cuando las galaxias estaban todas juntas. Existen otros modelos de universo. Por la época en que se estaban acumulando pruebas de la ley de Hubble, surgió una nueva solución a las ecuaciones de la cosmología relativista general. Se descubrió que eran posibles universos hiperbólicos abiertos y universos pulsantes cerrados. Un universo hiperbólico abierto es aquél en el cual empieza el universo, una vez ha sufrido una contracción infinita, a expansionarse hacia el infinito invirtiendo en el proceso un tiempo infinito. O bien, el universo pudo haber sido creado en cualquier momento entre ambos infinitos. Bajo esta concepción, la edad del universo es finita, pero su futuro infinito. Se trata aquí de infinitos reales matemáticos y no de números simplemente muy grandes, como los

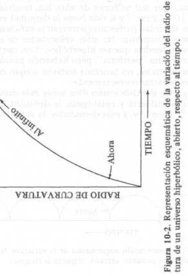


Figura 10-2. Representación esquemática de la variación del radio de curvatura de un universo hiperbólico, abierto, respecto al tiempo.



Figura 10-4. La extraordinaria galaxia NGC 5128 de la constelación del Centauro. Como radiofuente de intensa emisión se conoce por Centaurus A. (Cortesía de los Observatorios de Monte Wilson y Monte Palomar.)

cerrado. Recientemente se ha demostrado que tal dualidad está muy esparcida entre las radiogalaxias. ≪ La figura 10-4 es una fotografía de la extraordinaria galaxia NGC 5128, de la constelación Centaurus. Hubo un tiempo en el que se creyó que eran dos galaxias, una espiral vista de perfil y otra elíptica, en colisión. Ahora parece posible que sea una galaxia más sorprendida en el acto de una explosión en su núcleo. Se sabe también que esta galaxia es una radiofuente intrusa y se la conoce más corrientemente como Centaurus A. La radioemisión procede predominantemente de la periferia de la imagen óptica de la figura 10-4. Está dividida en dos componentes principales, uno por encima y otro por debajo de las zonas de polvo, oscuras y discontinuas del plano galáctico. ≫ La distancia entre los componentes de las radiogalaxias es característica hacia los 100000 parsecs. Si esta cifra es constante en todo el universo, entonces, en el espacio euclidiano, el ángulo aparente entre los componentes decrecerá cuando aumente nuestra distancia a las radiogalaxias. Sin embargo, si el espacio es cerrado, entonces, cuando observemos galaxias cada vez más remotas, este ángulo disminuirá solamente hasta un valor determinado. Al aumentar todavía más la distancia, empezará a aumentar el ángulo. Todavía no se han llevado a cabo observaciones de esta naturaleza; tendrían que ser numerosas para sacar conclusiones importantes definidas ya que tales mediciones serían difíciles y delicadas.

≪ Otro método posible para decidir entre universo abierto o cerrado, es determinar si existe en él algunas decenas más de materia que la detectada hasta el presente, aunque tal determinación observacional ha de esperar a la predicción teórica de la naturaleza, la temperatura y distribución de la misma. ≫ Probablemente hay campos magnéticos débiles relacionados con el medio intergaláctico, cuyas intensidades podrían ser decenas o centenas de veces menores que las de los campos magnéticos interestelares. Esta es la razón para creer que los campos intergalácticos han de girar el vector de polarización de la radiación de radioondas de las galaxias un ángulo que aumenta con la distancia a la fuente. (Recientemente se ha averiguado que la radiación procedente de las radiogalaxias está, efectivamente, polarizada linealmente en un pequeño porcentaje. Estas observaciones concuerdan con la hipótesis de que las radiogalaxias emiten principalmente a causa de la emisión sincrotrón.) Aunque esto pueda ser en potencia un medio para determinar la densidad de la materia intergaláctica, hay que hacer notar también que constituye un método complicado y delicado.

≪ Y aún hay que mencionar otro modelo cosmológico, que difiere en principio de los evolutivos precedentes. Es el del universo en "estado estacionario", de los astrónomos británicos Herman Bondi, Thomas Gold y Frey Hoyle. Los modelos evolutivos suponen explícitamente lo que se denomina el "principio cosmológico", que dice que el universo está estructurado de tal modo que ninguna observación hecha por un hipotético observador en cualquier lugar que se halle puede decirle donde se encuentra, en sentido absoluto. El principio cosmológico predice, pues, que el universo ha de aparecer más o menos igual a los observadores situados en cualquier lugar del espacio. Uno

a 10 mil millones de años de nosotros no ve menos galaxias ante él que por detrás, debido a la curvatura del espacio, exactamente igual, por ejemplo, que un habitante bidimensional de la superficie de la esfera no encuentra los bordes de su universo aun cuando su superficie sea finita.

≪ En una formulación de la teoría del estado estacionario se introduce un "principio cosmológico perfecto". Se supone que el universo tiene el mismo aspecto general no sólo para los observadores de todos los lugares, sino también para los de todos los tiempos, lo cual equivale a que nadie puede decir, en sentido absoluto, a partir de las observaciones que haga de su entorno, en qué época está viviendo. Y, sin embargo, las galaxias están en recesión y podemos imaginarnos que la densidad media de la materia en cualquier volumen del espacio tendrá que disminuir con el tiempo, por lo que la determinación experimental de la densidad nos tendría que dar una idea del tiempo cósmico. Para evitar esta contradicción, los proponentes de la hipótesis del estado estacionario postulan que la materia se está creando continuamente por todo el espacio a partir de la nada, a un ritmo que compensa de su empobrecimiento por la recesión de las galaxias. La hipótesis de que la materia se está creando continua y lentamente — tan lentamente que los aparatos actuales no pueden detectarla en la Tierra — en verdad que no parece más absurda que la hipótesis de que toda la materia del universo fue creada de la nada hace unos 10 mil ó 20 mil millones de años. Pero hay otras consecuencias observacionales de la hipótesis del estado estacionario.

≪En los modelos del estado estacionario, el universo es infinitamente viejo; además, en ningún momento está la materia muy evolucionada — sintetizada en las entrañas de muchas generaciones de gigantes rojas — convertida de nuevo en pulpa nuclear, como ocurre, por ejemplo, en las cúspides de pulsación de algunos modelos evolutivos. (Véanse, por ejemplo, las figuras 10-2 y 10-3.) Así pues, *en algún lugar* del universo tiene que haber galaxias inmensamente viejas — verdaderamente, infinitamente viejas. Es difícil predecir qué aspecto tendrán esas galaxias. Deben haber agotado casi todo el hidrógeno; las especies nucleares predominantes han de tener pesos atómicos elevados y, puesto que todas las estrellas serán enanas blancas o enanas negras, sus luminosidades intrínsecas tendrán que ser muy débiles. No tenemos conocimiento de tales galaxias, pues por su poca luminosidad resultan difíciles de ver, a menos que, por casualidad, estén situadas en nuestras proximidades. También deberían verse estados intermedios de la evolución galáctica. Si los estamos viendo, no lo sabemos.

≪En la teoría del estado estacionario, la inversa de la constante de Hubble *no* es aproximadamente el tiempo puesto que las galaxias estaban todas muy juntas. Por lo tanto, en dicha teoría, sería posible que en nuestra Galaxia hubiera edades estelares que excedieran a la inversa de la constante de Hubble. Tales estrellas, es claro que no podrían existir en las cosmologías evolutivas. Los signos de que estrellas tan viejas puedan realmente existir en los cúmulos globulares de nuestra Galaxia carecen de validez, como ya se mencionó en la página 89. Por desgracia y como hemos visto, las incertidum-

bres tanto en la observación como en la teoría no permiten distinguir, sobre estos fundamentos, entre cosmología evolutiva y de estado estacionario.

≪ Sin embargo, las observaciones recientes en radioastronomía permiten ahora hacer una decisión tentativa entre cosmología evolutiva y de estado estacionario. ≫ Los radiotelescopios nos permiten estudiar radiogalaxias que están de nosotros a tan vastas distancias, que intervienen los efectos relativistas en la interpretación de las observaciones. Se ha averiguado que la densidad espacial de las radiogalaxias que están a varios miles de millones de años luz de nosotros es significativamente mayor que la densidad espacial de las radiogalaxias relativamente próximas. ("Próximas" es, desde luego, un término puramente relativo. Para este objeto, una galaxia próxima es la que está tan cerca como mil millones de años luz.) Esto implica que en los primeros tiempos el porcentaje de radiogalaxias era muy superior al actual. ≪ Esta circunstancia, por sí sola, es una contradicción del principio cosmológico perfecto e incongruente al menos con la formulación de la hipótesis del estado estacionario. ≫

Una causa posible de esta distribución desigual de las radiofuentes pudo ser la presencia, en aquellos primeros tiempos, de grandes cantidades de gas intergaláctico, cuyo influjo en las regiones centrales de las galaxias pudo haber sido mucho mayor, llevando a más explosiones en los núcleos galácticos. (Véase el capítulo 9.)

≪ En función de las cosmologías evolutivas — según las cuales cabe esperar que las galaxias hayan estado más próximas todas ellas en épocas remotas a como lo están actualmente — se puede fundamentar otra explicación de la distribución irregular de las radiogalaxias a distancias muy grandes. Puesto que las galaxias distantes se están viendo cómo eran en épocas remotas, podemos verdaderamente esperar que aumente con la distancia la densidad espacial de radiogalaxias.

≪ Por último, las desviaciones de la ley de Hubble demostradas por el movimiento de las galaxias muy remotas, tampoco concuerdan con la hipótesis del estado estacionario. Las pruebas pues, consideradas en conjunto, parecen apoyar las cosmologías evolutivas aunque todavía no se puede hacer una elección definitiva entre ellas.

≪ Volvamos ahora a la paradoja de Olbers. Una razón de que el cielo esté oscuro por la noche puede ser la falta de estrellas que tengan más de 20 mil millones de años. En tal caso, los objetos que se encuentran a más de 20 mil millones de años luz, todavía no pueden contribuir con su luz a alumbrar el cielo por la noche. De la recesión de las galaxias surge otra explicación moderna de la paradoja de Olbers. Como se mueven alejándose de nosotros, el efecto Doppler hace que disminuya la energía de la luz que emiten hacia la Tierra. Esa disminución se ve como un enrojecimiento de la luz. A medida que sus velocidades se acercan a la de la luz, la energía de las galaxias cada vez más distantes va disminuyendo continuamente hasta que, por último, un fotón emitido en el espectro visible se recibe en la Tierra en la región infrarroja o, efectivamente, en la de microondas o región radio. Así pues, cuando contem-

plamos las galaxias remotas, que receden a velocidades cada vez más próximas a la de la luz, la energía que recibimos de ellas es cada vez más pequeña a causa del *efecto* Doppler y además, claro está, de la ley de la inversa del cuadrado de la distancia.

Por complicado que sea el sistema detector de radiaciones que construyamos, siempre nos podremos imaginar una galaxia viajando con una velocidad tan cercana a la de propagación de la luz, que no podamos detectar en la Tierra su producción de energía. Por lo tanto, hay un límite tajante a la distancia de las galaxias más remotas que podemos ver; límite que se sitúa, aproximadamente, entre los 10 y 20 mil millones de años luz.

≪ Cabría preguntarse si esta explicación no contradice el principio de conservación de la energía. Los hipotéticos habitantes de una galaxia muy lejana, con un rápido movimiento de recesión, miden una salida de radiación conmensurable hacia la Tierra. Cuando un fotón de luz visible sale de esa galaxia, sus habitantes lo miden como tal, pero cuando llega a la Tierra, hallamos que está en la frecuencia del rojo y le atribuimos una energía mucho menor. Con todo, al final, nuestra descripción y la de ellos sobre la producción de energía de la galaxia deben cuadrar. La solución de esta adivinanza se tiene si imaginamos algunos otros observadores, igualmente distantes de la galaxia en recesión, pero situados por el otro lado de ella. Esos observadores, si los situamos en reposo respecto a nosotros, verán la galaxia en cuestión corriendo hacia ellos. La luz emitida por la galaxia se les desplazará ahora hacia el violeta y el nuevo conjunto de observadores atribuirá a cada fotón más energía que la que se mide en la galaxia que la emite, con lo cual, el déficit de radiación emitida hacia atrás por la galaxia que se mueve tan rápidamente se compensa por la mayor energía de radiación hacia adelante y cuando se contabiliza el total resulta que se conserva la energía.

≪ Sin embargo, en realidad, los observadores distantes estacionarios respecto a nosotros no existen. El universo se está expandiendo y el principio cosmológico precisa que todos los observadores lleguen a algo como la ley de Hubble. La degradación de la energía, cual representa el desplazamiento hacia el rojo, *proporciona parte de la energía para la expansión continuada* del universo y no habrá observadores que sean testigos del desplazamiento al violeta.

≪ Esta consideración del desplazamiento hacia el violeta es de cierta importancia cuando consideramos que, en el universo pulsante, éste tuvo que haber estado contrayéndose hace unos 20 mil millones de años. ≫ Y haber llevado esto a un aumento significativo de radiación "dura" en onda corta, por el desplazamiento hacia el violeta de la radiación emitida por las galaxias convergentes. Con el tiempo, dicho desplazamiento tuvo que haber sido tan grande, que la probabilidad del origen y desarrollo de la vida en aquellos tiempos tuvo que ser muy remota.

Así pues, si es válida la teoría del universo pulsátil y al final hay que cambiar la época del desplazamiento hacia el rojo por la del desplazamiento

hacia el violeta, hemos de llegar a la siguiente conclusión: El origen y evolución de la vida en regiones apropiadas del universo son más probables durante la épocas de desplazamiento hacia el rojo que durante las de desplazamiento hacia el violeta ≪ a causa del gradual incremento del flujo de luz ultravioleta, rayos X y rayos gamma. ≫ Durante todo el largo período de expansión, la vida podría negociar la jornada evolutiva desde las formas más simples a las más elevadas. Pero con el advenimiento de la fase de contracción, se haría cada vez más difícil y llegaría a desaparecer, tan sólo para resurgir y volver a desarrollarse en el período siguiente de expansión.

≪ Si bien es cierto que aún no sabemos si nuestro universo ha de experimentar efectivamente una fase de contracción, estamos a punto de averiguarlo. ¿Se expande para siempre el universo o estamos atrapados en un vasto ciclo de muertes y renacimientos cósmicos? ≫

11 Sistemas de estrellas múltiples

¿Atas tú los lazos de las Pléyades,
o puedes soltar las ataduras del Orión?

Job, 38-31

≪ Para proseguir nuestra indagación de la naturaleza y distribución de la vida en el universo, debemos ahora circunscribir nuestro campo visual del gran panorama cosmológico al estudio del aparentemente trivial de las estrellas particularmente. Si las estrellas se mueven en esplendor aislado, sin la compañía de sistemas planetarios, podemos suponer pocos casos de vida en el ámbito del espacio cósmico. En los tres capítulos siguientes consideraremos las pruebas observacionales y teóricas de que fuera de nuestro sistema solar hay otros planetas que dan vueltas a otras estrellas. ≫

En los capítulos 3 y 4 hemos considerado ciertas características fundamentales de las estrellas, su diámetro, luminosidad, color, edad y evolución; ahora consideraremos otra propiedad más: su multiplicidad. Muchas estrellas ≪ (al menos, un 30% y quizá más de un 50%) ≫ forman sistemas dobles, triples o múltiples, en los cuales las distintas estrellas dan vueltas unas alrededor de las otras. Pero los períodos de revolución pueden variar desde unas horas a miles de años, dependiendo de sus masas y separación. Las figuras 11-1 y

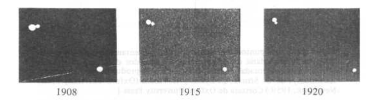


Figura 11-1. Fotografía de la estrella binaria visible a simple vista ξ Ursae Majoris (1) en 1908, 1915 y 1920. El movimiento relativo de la secundaria alrededor de la primaria más brillante resulta evidente. (Cortesía del Observatorio de Yerkes.)

11-2 muestran las sucesivas posiciones relativas de las estrellas particulares del sistema de estrella doble Ursae Majoris. En muchos casos, las componentes de un sistema de estrella múltiple están tan juntas que no pueden resolverse.

1.- N. del T. En la Osa Mayor, existe otra estrella binaria ζ Ursae Majoris, cuyo nombre propio es Mizar y su acompañante se denomina *Alcor*, conocida también con el nombre vulgar de "estrella de la buena vista".

≪ Aparece entonces el sistema a la vista o en la placa fotográfica como una estrella simple. ≫ En tales casos, se puede a menudo confirmar la multiplicidad por las observaciones espectrales. Debido a los movimientos orbitales de las estrellas alrededor unas de otras, sus movimientos según la visual son desiguales y variables con el tiempo. Por ejemplo, en un momento dado de su movimiento orbital mutuo, una estrella se nos puede estar aproximando y la otra estar en recesión ≪ y al cabo de un período de media órbita, haberse invertido los movimientos de aproximación y recesión. ≫ Estos movimientos, por efecto Doppler, llevan a un pequeño desplazamiento de longitud de onda de las rayas del espectro de una estrella respecto a las correspondientes de la

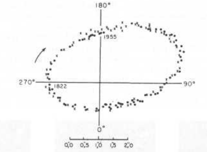


Figura 11-2. Los puntos, círculos y cruces representan el movimiento aparente de la secundaria de ξ Ursae Majoris alrededor de la primaria en las observaciones efectuadas entre 1822 y 1955. [Reproducido de Elementary Astronomy, de O. Struve, B. Lynds y H. Pillans (Oxford University Press, New York, 1959.) Cortesía de Oxford University Press.]

otra. Por las traslaciones en las órbitas, variarán periódicamente las velocidades según la visual y, por esto, los desplazamientos de las rayas del espectro también variarán periódicamente. Por observación sistemática de tales desplazamientos de las rayas del espectro según varían con el tiempo, no sólo se puede deducir la multiplicidad del sistema, sino que pueden calcularse con certeza las características básicas de la órbita y recogerse información sobre las masas propias de los componentes deducidos. Estas estrellas dobles tan juntas, se llaman *binarias espectroscópicas*.

≪ Las componentes de un sistema de estrella múltiple dan vueltas una alrededor de la otra, generalmente en un plano orbital común, semejante a aquél en el que encontramos al Sol y los planetas de nuestro sistema. La

orientación de esos planos es más o menos aleatoria, de modo que algunas estrellas darán vueltas alrededor de otras en el plano de la Galaxia; otras, en un plano normal a ésta y la mayoría en planos inclinados cualesquiera. ≫ Así pues, rara vez el plano de la órbita de un sistema de estrella doble o múltiple forma un ángulo muy cerrado con la visual. En cambio, si es así se puede observar el eclipse de una estrella por la otra. Puesto que no puede verse por separado a ninguno de los componentes, ni siquiera con los telescopios más potentes, observamos solamente la variación periódica del brillo del sistema de estrella doble. Al principio del eclipse disminuye el brillo; al final, la estrella recobra su luminosidad normal. (A menudo el eclipse suele durar varias horas.) Representando el brillo en función del tiempo (la denominada "curva de brillo") podemos determinar no solamente los parámetros básicos de la órbita, sino también los diámetros de las estrellas e incluso datos sobre el amortiguamiento del brillo del disco estelar desde el centro hacia el borde ≪ o *limbo*. Dado que hasta las estrellas más cercanas aparecen como un punto de luz en el telescopio más potente, esas observaciones del "oscureci-

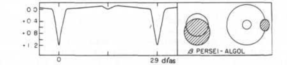


Figura 11-3. Representación esquemática de la curva de luz de una estrella binaria eclipsante. A la izquierda, las magnitudes e intensidades aparentes están representadas en función del tiempo. Las dos intensidades mínimas principales corresponden a las dos posiciones por órbita en que las estrellas se eclipsan la una a la otra. A la derecha, configuración relativa cuando la estrella más oscura eclipsa a la más brillante y órbitas correspondientes. [Reproducido de Elementary Astronomy, de O. Struve, B. Lynde y H. Pillans (Oxford University Press, New York, 1959.) Cortesía de Oxford University Press.]

miento del limbo" son de lo más curioso. ≫ En la figura 11-3 se ve un esquema de la órbita de la estrella variable eclipsante Algol y la curva de brillo correspondiente. ≪ El sistema Algol, en la constelación de Perseo, sufre un eclipse aproximadamente cada tres días. Cuando la componente brillante está parcialmente eclipsada por su compañera relativamente oscura, el brillo total de Algol desciende a más del 50%. Esta variación en luminosidad

se detecta fácilmente a simple vista y esta es la razón por la cual se conocía en la antigüedad a Algol como la "estrella demonio". ≫ (1)

Tanto en las binarias espectroscópicas como en las eclipsantes, las estrellas componentes están muy cerca la una de la otra. A veces, de hecho, sus superficies están en contacto material. ≪ Hay fuerzas periódicas que arrancan material de una estrella hacia la otra según hermosos y complejos modelos. El material que se intercambia de estrella a estrella es de por sí luminoso. Desde un hipotético planeta en órbita alrededor de un sistema estelar así, (y tales planetas son posibles), un observador vería dos soles en el cielo, quizá de distinto tamaño, luminosidad y color, con una banda de luz brillante y luminosa que aparentemente abrazara a los dos. ≫ Tales sistemas de estrella múltiple suelen estar inmersos en extensas envueltas gaseosas enrarecidas. En las figuras 11-4 y 11-5 se ven dos esquemas de estos pares próximos. Por desgracia, estos procesos fascinantes no se observan visualmente, ni siquiera con los telescopios más grandes y nuestros conocimientos sobre ellos los adquirimos solamente a partir de los análisis de los espectros y del brillo de las estrellas.

Por las leyes de Kepler sabemos que los períodos de rotación cortos corresponden a las estrellas que están más juntas; el más corto conocido, de aproximadamente 80 minutos de duración, pertenece a la variable eclipsante WZ Sagittae.

≪ WZ Sagittae es la cuadragésima octava estrella variable descubierta en la constelación de Sagita (es decir, "flecha" y que no hay que confundir con la constelación cercana de Sagitario, que quiere decir "arquero"). La notación astronómica para las estrellas variables de una constelación dada, es un testimonio trágico de las deficiencias de la visión a corto plazo y no estará de más detenernos un momento y considerar los caprichos de la notación de las variables. Si una estrella ya bautizada se descubre que es variable, retiene su nombre original. Así, δ Cephei y Algol no presentan problemas. La primera estrella de una constelación determinada que se reconoce como variable y que no tiene nombre propio ni letra griega de pertenencia, se designa con la mayúscula R, así, R Sagittae; los siguientes descubrimientos se designan con la S, T, . . . , Z. Esta artimaña sirve mientras no se descubran más de nueve variables nuevas por constelación, pero para asombro de los astrónomos se *descubrieron* más de nueve por constelación. Habiendo agotado las letras de la R a la Z, se decidió emplear una notación con dos letras, empezando por RR, RS, RT, . . . , RZ, SS, ST, . . . , SZ, y así sucesivamente hasta llegar a ZZ, teniendo así referencias para las primeras 54 nuevas variables descubiertas. Pero en el cielo hay muchas estrellas y con la actividad astronómica continuada, se llegaron a descubrir variables más allá de la ZZ.

1.- N. del T. Su propio nombre ya es significativo, procede del árabe, al-gul, que significa "ogro".

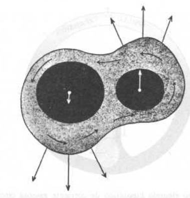


Figura 11-4. Representación esquemática de un sistema de estrella doble cerrado que comparte una envolvente gaseosa común que circula entre ambas. Cada estrella de por sí está distorsionada por la configuración esférica debido a la mutua interacción gravitatoria y a sus rotaciones. [Reproducido de Stellar Evolution, de O. Struve (Princeton University Press, Princeton, 1950.) Cortesía de Princeton University Press.]

≪ El próximo procedimiento fue empezar por la AA y seguir por AB, AC, . . . , AZ; BB, BC, BD, . . . , BZ, hasta QZ. Por problemas de transcripción se omitió la letra J. Esta serie termina en QZ. El próximo doblete lógico no empleado todavía tendría que ser RA y como los que empiezan por R ya se habían usado previamente en la serie, hubo de prescindirse de las designaciones RA, RB, . . .

≪ Esta elaborada necedad sirve para las primeras 334 estrellas variables de una constelación determinada. Una constelación típica grande –la de Sagitario, por ejemplo,– puede tener identificadas 1700 estrellas variables. La obstinada notación por letras supuso que el número de variables a descubrir sería pequeño. En realidad, su número es muy grande; en la edición soviética de 1958 del catálogo general de estrellas variables, aparecen 14711 conocidas en la Galaxia. Al final, para designarlas, los astrónomos se han decidido a emplear la letra V como símbolo de variable y a continuación un número, empezando por el 335, para indicar su lugar en la lista de las descubiertas, como por ejemplo, V 678 Centauri. ¡Cuánto más sensato habría sido designar por V1 a la primera variable y continuar la serie! Naturalmente, aún es posible revisar la notación llamando 1,2,3, . . . a R, S, T, . . .,

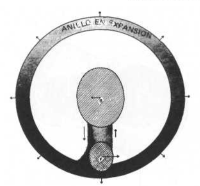


Figura 11-5. Otro ejemplo hipotético de corriente gaseosa circulante que conecta estrellas binarias cerradas. [Reproducido de Stellar Evolution (Princeton University Press, Princeton, 1950.) Cortesía de Princeton University Press.]

etc, pero ya se han arraigado las letras y al parecer hay pocas esperanzas para un sistema más racional. Si bien esta anacrónica notación no la vamos a encontrar a partir de ahora, no ayuda a que se popularice la astronomía. ≫

Parece ser ahora que todas las novas tienen lugar en los sistemas de binarias próximas. Durante la explosión de una nova aumenta grandemente la luminosidad de la estrella en un período de tiempo breve, aunque sigue siendo miles de veces menor que la de una supernova. La masa de material expelido en cada explosión de nova es, aproximadamente, de 10^{-4} a 10^{-5} la masa de nuestro Sol. Aparentemente, la presencia de un vecino estelar próximo interfiere la evolución normal de una estrella; sobre todo, cuando entra en la fase de gigante roja. Entonces, como su radio aumenta enormemente, surgen desequilibrios que conducen a explosiones repetidas, que a veces son periódicas.

Con frecuencia, las masas de las componentes de un sistema de estrella binaria son muy parecidas; otras, en cambio, sucede que la de una es diez o más veces la masa de la otra. Sus luminosidades relativas pueden variar ampliamente. Por ejemplo, la débil acompañante de Sirius es una enana blanca. ≪ Fue la primera enana blanca que se descubrió y cuya masa (muy densa para su pequeño radio) se dedujo a partir de su traslación en la órbita. ≫

Algunas componentes de los sistemas de estrellas múltiples tienen un tamaño tan pequeño, que su luminosidad es insignificante. Resultan imposibles de observar visualmente, incluso con potentes telescopios. Pero si dichas componentes infraluminosas se encuentran a gran distancia de la primaria (la de más masa y mayor brillo), se puede entonces deducir su existencia y propiedades. El ejemplo clásico de un sistema de estos es 61 Cygni, ≪ investigada por el astrónomo americano K. A. Strand y el soviético A. N. Deutsch. La primaria tiene un movimiento aleatorio, llamado "propio", sobre el fondo del campo relativamente fijo de las estrellas. Si la primaria tiene una acompañante masiva, infraluminosa, además de su movimiento propio, tendrá otro menor, periódico, alrededor del centro de masa del sistema de estrella doble. El movimiento total resultante a lo largo de un período de muchos años, es una línea ondulada como la de la figura 11-6. La observación de esos movimientos periódicos requiere mucha paciencia, precisión y dedicación. Cuanto más lejos esté de nosotros la primaria perturbada, más difícil resulta comprobar las variaciones periódicas de su movimiento propio. No es de sorprender, pues, que las distintas acompañantes invisibles descubiertas por este sistema, pertenezcan todas a primarias que están entre las estrellas más próximas.

≪ Para tener una idea de la frecuencia de los sistemas de estrellas múltiples y de acompañantes oscuras, consideremos los 12 sistemas estelares más cercanos al Sol. Se citan en la tabla III junto con sus tipos de espectros y distancias al Sol expresadas en años luz. La multiplicidad de nombres surge de la tozudez de los astrónomos en emplear distintos catálogos. El símbolo *e*

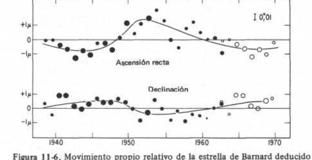


Figura 11-6. Movimiento propio relativo de la estrella de Barnard deducido por Van de Kamp. La ascensión recta y la declinación forman un sistema de coordenadas ortogonales corriente en astronomía. La barra de error en el vértice superior de la derecha ilustra una desviación característica de los puntos observados en realidad respecto a la curva. Aunque las observaciones son muy difíciles de efectuar, parece que hay pocas dudas sobre la realidad de estas curvas. (Cortesía del Dr. Peter van de Kamp. Observatorio de Sproul.)

en la columna del tipo espectral indica estrellas que muestran rayas de emisión; el símbolo *wd* denota enana blanca (del inglés white dwarf). Observamos que la generalidad de las estrellas más próximas son estrellas M, de poca luminosidad. De estos doce sistemas, al menos cuatro son múltiples en base a la comprobación visual y espectográfica solamente. Una de ellas, α Centauri, es un sistema triple. La componente de poca masa, α Centauri C, está en órbita alrededor de las otras dos componentes. Puesto que está a veces ligeramente más cerca del Sol que α Centauri A y B, es la estrella más próxima al Sol y, en consecuencia, se le llama a veces Próxima Centauri.

≪ Además, por lo menos tres de estos doce sistemas tienen acompañantes oscuras con masas alrededor del uno por ciento de la masa del Sol o menos. La primera de esas acompañantes, descubierta en 1943 por K. A. Strand, pertenece al sistema 61 Cygni y tiene una masa aproximadamente del 0,8% la del Sol. En 1960, el astrónomo americano Sarah Lee Lippincott, del Observatorio Sproul, descubrió una acompañante que tiene una masa como del 1% la del Sol, en la estrella Lalande 21185. En 1964, Peter van de Kamp, también del mismo observatorio, encontró una acompañante sumamente interesante de la estrella de Barnard, el segundo sistema más próximo, a sólo seis años luz. La estrella de Barnard es una pálida enana roja descubierta en 1916 y llamada así en honor de su descubridor. Tiene el mayor movimiento propio de todas las estrellas conocidas. En la figura 11-6 se presentan los resultados de 25 años de observaciones metódicas de Van de Kamp. Los puntos representan las posiciones observadas y la línea continua es la curva periódica que las mismas determinan. La acompañante oscura que se colige de estas observaciones, tarda 24 años en recorrer su órbita alrededor de la estrella de Barnard y tiene una masa como del 0,15% la del Sol. Esa masa es solamente un 50% mayor que la de Júpiter, que invierte 11,9 años en recorrer su órbita alrededor del Sol. Las acompañantes de Lalande 21185 y de 61 Cygni son lo suficientemente masivas como para brillar tenuamente por luz propia y clasificarse por tanto como estrellas muy infraluminosas en vez de como planetas muy grandes. En cambio, la acompañante de la estrella de Barnard, casi con seguridad que es un planeta. Este mundo todavía sin nombre es el primer planeta descubierto desde que el astrónomo americano Clyde Tombaugh localizó a Plutón en 1930. Pero además tiene la distinción única de ser el primer acompañante planetario, descubierto con bastante grado de seguridad, de un sol distinto al nuestro. El planeta de Van de Kamp quizá no sea el único acompañante de la estrella de Barnard y que los menos masivos sean mucho más difíciles de detectar. De igual modo puede haber más acompañantes planetarios de Lalande 21185 o de 61 Cygni y, evidentemente, de cualquiera de las otras estrellas situadas en la tabla III. Cuanto más distante esté la estrella, más difícil es detectar esos planetas de poca masa.

≪ La muestra de estrellas presentada en la tabla III es tan sólo una fracción mínima del total de ellas en nuestra Galaxia, pero la única en la que por lo menos podemos hacer la búsqueda preliminar de acompañantes oscuras. La consideraremos típica de regiones similares en cualquier parte de la Galaxia. De esos trece sistemas, incluido el solar, al menos dos tienen planetas: el Sol y la estrella de Barnard. Pero desde nuestro puesto de observación, estos son dos de los tres sistemas más próximos, lo cual sugiere que al menos el 10% y quizá más del 50% de las estrellas van acompañadas de sistemas planetarios. ≫

La diferencia entre planetas gigantes y estrellas oscuras acompañantes, no es absoluta. Ambos constan principalmente de hidrógeno y helio. Fundamentalmente, son esferas gaseosas sujetas por la fuerza de gravedad. Si la masa de Júpiter fuera cinco veces mayor, la temperatura en su región central aumentaría y comenzaría a radiar, aunque débilmente, en la parte visible del espectro. Se convertiría entonces en una enana roja muy tenue, con temperatura superficial de aproximadamente 1000 a 2000 K.

≪ Para tener una idea mejor de la distribución de los planetas por todo el espacio cercano que nos rodea, deberíamos incrementar la búsqueda de acompañantes de masa jovial y menor, a otros sistemas planetarios, problema

Tabla III.
Las estrellas más próximas

Número	*Sistema*	*Componente*	*Espectro*	*Distancia al Sol (años luz)*
0	El Sol		G 0	0
1	Alfa Centauri	A	G 0	4,3
		B	K 5	4,3
		C	M 5e	4,3
2	Estrella de Barnard		M 5	6,0
3	Wolf 359		M 6e	7,7
4	Luyten 726-8	A	M 6e	7,9
		B	M 6e	7,9
5	Lalande 21185		M 2	8,2
6	Sirius	A	A 0	8,7
		B	wd	8,7
7	Ross 154		M 5e	9,3
8	Ross 248		M 6e	10,3
9	Epsilon Eridani		K 2	10,8
10	Ross 128		M 5	10,9
11	61 Cygni	A	K 6	11,1
		B	M 0	11,1
12	Luyten 789-6		M 6	11,2

que se tratará en términos teóricos en los dos próximos capítulos. ≫ Ahora, consideramos los posibles métodos astronómicos futuros que se podrían usar para aumentar nuestro conocimiento sobre acompañantes planetarios y estrellas cercanas. Limitamos nuestra exposición a la detección de planetas grandes porque si no *los* podemos observar, la búsqueda de otros planetas más pequeños, aunque quizá más interesantes, sería infructuosa.

Supongamos que a una distancia de 10 parsecs -unos 33 años luz- hay una estrella parecida a nuestro Sol y que un gran planeta da vueltas alrededor de esa supuesta estrella, a una distancia de 5,2 unidades astronómicas (U. A.), la misma a que está Júpiter del Sol. Supongamos, además, que ese planeta tiene el mismo tamaño y masa que Júpiter y también que ≪ (por fortuna para nosotros) ≫ su órbita está casi exactamente en el mismo plano que la órbita terrestre.

En principio, son tres los métodos que podemos emplear para detectar nuestro planeta. El primero es por las perturbaciones periódicas en el movimiento propio de la estrella, ≪ tal como el empleado para descubrir el planeta de Van de Kamp. ≫ El período de la perturbación sería igual al período de la revolución del planeta –11,9 años en nuestro caso. Este movimiento periódico se debe, a su vez, a que la estrella, influida por el campo gravitatorio del planeta, recorre una órbita elíptica alrededor del centro de gravedad del sistema planeta-estrella. Este movimiento orbital se superpone al movimiento propio estelar. Puesto que la masa de la estrella es unas 1000 veces la del planeta, el centro de gravedad del sistema queda muy cerca de aquella. Así pues, la amplitud del movimiento periódico sería muy pequeña.

Los cálculos efectuados por el astrónomo ruso-americano Otto Struve indican que la amplitud de esta onda para una estrella situada a 10 parsecs, superpuesta al movimiento propio sería menor que 0,0005 segundos de arco por año, que es un ángulo muy pequeño (véase el capítulo 3) que queda muy por fuera de los límites de exactitud de las técnicas astronómicas actuales. Sin embargo, si la masa fuera de 10 a 20 veces la de Júpiter se podrían detectar esas oscilaciones -aunque con alguna dificultad.

La espectroscopia es otro método para detectar la presencia de tales planetas. Las perturbaciones de la acompañante planetaria ocasionan variaciones periódicas de la velocidad de la estrella según la visual. Es fácil ver que a veces la estrella es atraida ligeramente hacia nosotros y otras hacia el lado opuesto. El período de la oscilación de las velocidades radiales será de nuevo igual al período de la revolución del planeta e, igualmente, este efecto es muy pequeño. Otto Struve demostró que las variaciones periódicas de la velocidad radial ≪ (es decir, de la velocidad hacia nosotros o la opuesta) ≫ no superaría a los 10 metros por segundo, lo cual es, a grosso modo, 10^{-3} del total de la velocidad radial total de una estrella media debida a su movimiento propio. Por efecto Doppler, las velocidades de 10 metros por segundo corresponden a un desplazamiento de la raya espectral de, aproximadamente, 0,0001 Å ≪ (Recordemos que 1 Å = 10^{-8} cm y que la longitud de onda de la luz visible queda entre 4000 y 7000 Å.) ≫ De momento, esas variaciones tan

pequeñas en la longitud de onda no se pueden medir, sobre todo si consideramos que las rayas del espectro no son infinitamente finas, sino que tienen un grueso del orden de 0,1 Å.

Un tercer método para detectar los sistemas planetarios alrededor de las estrellas cercanas, es el fotométrico, es decir, la medición sistemática del brillo de una estrella. Hemos supuesto que la órbita de nuestro hipotético planeta está en el mismo plano que la órbita de la Tierra, ≪ circunstancia que tan sólo se da de modo fortuito. ≫ De aquí que, periódicamente, cada 11,9 años, el planeta se proyectará sobre el disco de la estrella cuando pase por delante de ella. Fenómenos semejantes se observan en nuestro sistema solar -por ejemplo, cuando Venus y Mercurio cruzan el disco del Sol. Puesto qué el planeta es oscuro –carece de luz propia– cuando pase por enfrente de la estrella, el brillo de ésta (o con más propiedad, el flujo de su radiación) aparecerá ligeramente disminuido, según se mire desde la Tierra. El fenómeno es del todo análogo al ya descrito para las binarias eclipsantes. (Véase la figura 11-3.)

Los cálculos indican que si un planeta del tamaño de Júpiter pasara por delante de una estrella semejante al Sol, la luminosidad de ésta disminuiría aproximadamente en 0,01 magnitudes estelares. Una variación así, tan pequeña, en el flujo de radiación, se puede registrar mediante los fotomultiplicadores existentes. Hemos de recordar, sin embargo, que estamos considerando un caso muy ideal en el cual ocurre en realidad un eclipse visto desde la Tierra. Una inclinación del plano de la órbita de ese supuesto planeta, de tan sólo medio segundo de arco, haría que el planeta no se proyectara ya en absoluto, sobre la estrella, observado desde la Tierra. ≪ Así pues, si bien en principio el método es correcto, en la práctica sólo sirve si es que tenemos mucha suerte, puesto que los planos de las órbitas planetarias tienen una distribución de inclinaciones totalmente aleatorias. Unicamente si observamos muchas estrellas llegaremos, quizá, a encontrar por este método una acompañante planetaria. ≫

En la figura 11-7 se resumen estos tres métodos para descubrir sistemas planetarios extrasolares.

≪ Muchas de las dificultades en la utilización de estos métodos se deben a nuestra inimaginativa elección de la Tierra como estación de observación. ≫ Los potentes telescopios sobre la Tierra no pueden trabajar a su capacidad teórica por la turbulencia atmosférica, o lo que los astrónomos llaman "poca visibilidad". Incluso una fuente puntual de luz brillante –para nuestro objeto, una estrella– se ve difuminada como un disco con un diámetro de 0,5 a 2 segundos de arco. Si un planeta estuviera a 1 U. A. de su primaria y ésta a su vez a unos 10 parsecs de nosotros, entonces, la distancia angular entre el planeta y la estrella sería, aproximadamente, de 0,1 segundo de arco. Así pues, no hay telescopio en la Tierra, cualquiera que sea su tamaño, capaz de separar la imagen del planeta de la difuminada de la estrella.

No obstante, en un futuro próximo, quizá podamos observar directamente grandes planetas pertenecientes a las estrellas próximas. El instrumento

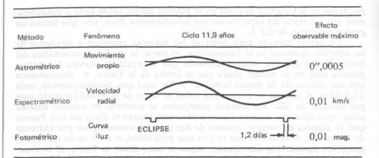


Figura 11-7. Representación esquemática de los métodos astrométricos, espectrométricos y fotométricos de detectar sistemas planetarios extrasolares alrededor de estrellas distantes 10 parsecs.

que hace falta es un gran telescopio en órbita alrededor de la Tierra. ≪ Tales observatorios astronómicos en órbita son motivo de estudio intenso de la NASA, aunque sus principales objetivos científicos son los estudios de las estrellas y del medio interestelar en las longitudes de onda ultravioleta hasta el presente inaccesible. El observatorio astronómico en órbita del programa espacial de los Estados Unidos (2) es un satélite no tripulado. En la Unión Soviética se pueden estar desarrollando instrumentos semejantes, quizá juntamente con naves espaciales tripuladas. ≫

Aunque un observatorio en órbita estará muy por encima de la turbulencia atmosférica, no llegará a observar ni fotografiar objetos que tengan pequeñas separaciones angulares indefinidas. La propia naturaleza ondulatoria de la luz impone un límite a nuestra capacidad para resolver los objetos próximos. Debido a la difracción en la lente del objetivo o en el espejo de un telescopio, la imagen del plano focal de cualquier estrella es un sistema de anillos de anchura definida. El límite de resolución por difracción de cualquier telescopio es aproximadamente igual a la razón de la longitud de onda de la luz al diámetro del objetivo. Por ejemplo, con luz azul y lente o espejo de objetivo de un metro de diámetro, dos estrellas que estén muy juntas, se distinguirán si están a más de un 0,1 segundo de arco la una de la otra. ≪ Si están más juntas, se fundirán sus imágenes y darán como resultado una difracción difusa indistinta. ≫

Sin embargo, el empleo de un instrumento especial, denominado interferómetro, nos permite medir fuentes de luz que tan sólo las separe una

2.- N. del T. Se refiere al popular "Sky Lab" reintegrado a la Tierra en julio de 1979.

distancia angular de 0,01 segundo de arco. ≪ Si tanto el planeta como la estrella tuvieran intensidades grandes y comparables, se podrían efectuar sobre la Tierra observaciones interferométricas con los telescopios, pero como el brillo de un planeta es inapreciable en comparación con el de su estrella, la dispersión de la luz y la turbulencia de la atmósfera terrestre impiden tales observaciones. ≫

Consideremos un planeta jovial a 1 U. A. de su estrella, la cual es de tipo solar y que está a unos 10 parsecs de nosotros. Se supone que la magnitud aparente de ese planeta es aproximadamente +24. Incluso una fuente de luz tan débil se podría detectar desde un observatorio espacial en órbita con los métodos astronómicos corrientes. Sin embargo, no parece probable que se puedan realizar automáticamente observaciones decisivas, por lo menos, en el futuro inmediato. Haría falta pues un astronauta astrónomo ≪ en el contexto de este problema ≫ para el observatorio astronómico en órbita. Quizá algún día se instale en la Luna un gran observatorio fijo; entonces será posible llevar a cabo observaciones generales sobre muchos problemas astronómicos importantes que de momento son difíciles o imposibles de realizar debido al oscurecimiento de la atmósfera terrestre.

Aunque al presente nuestro testimonio directo de los sistemas planetarios extrasolares es limitado, resulta razonable considerar la multiplicidad estelar y los sistemas planetarios como aspectos distintos de un mismo fenómeno. De acuerdo con las investigaciones del astrónomo holandés-americano G. P. Kuiper, de la Universidad de Arizona, la distancia media entre las componentes de un sistema de estrella binaria, es aproximadamente de 20 U. A., la cual está próxima a las dimensiones de nuestro propio sistema solar.

¿Cómo surgen los sistemas de estrellas múltiples? Antiguamente, había teorías que pretendían explicar la formación de las estrellas binarias por la separación de una simple en dos componentes, atribuyendo la fisión a su rápida rotación. A causa de la fuerza centrífuga, la superficie de una estrella en rápida rotación dejaría de ser esférica. Los cálculos matemáticos indican que dadas ciertas condiciones ideales, un cuerpo que gira a mucha velocidad toma la forma característica de una pera y si aún aumenta la velocidad se llega al desequilibrio y la estrella se divide en dos componentes, ≪ Cada una de las cuales gira más despacio que la estrella de que proceden. ≫ Sin embargo, esta hipótesis no responde bien a las observaciones y, por tanto, la desestimamos de la formación de las estrellas binarias.

Otra opinión, por ejemplo, la de D. Y. Schmidt, de la Unión Soviética, postula el atrapamiento, es decir, que en determinadas condiciones, dos estrellas que se mueven por el espacio independientemente, se supone que se emparejan gravitacionalmente en un encuentro fortuito y forman un sistema de estrella doble. Aunque matemáticamente este proceso es posible (por ejemplo, en el encuentro accidental de tres estrellas independientes), la probabilidad de tal acontecimiento es sumamente remota. Además, el modelo del atrapamiento está en contradicción con las observaciones. Por

ejemplo, no puede explicar por qué los sistemas estelares cuádruples se encuentran siempre según la norma sistemática de por parejas, como en la figura 11-8.

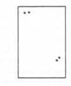


Figura 11-8. Posiciones relativas invariables de un sistema de estrella cuádruple. En estos sistemas se observan siempre dos binarias con sus órbitas correspondientes.

La mayor parte de la información astronómica importante recopilada en los últimos 20 años indica que las estrellas de los sistemas múltiples son contemporáneas, formadas simultáneamente del gas y polvo del medio interestelar. A partir de esas condensaciones se forman grupos de estrellas, asociaciones enteras de cúmulos (capítulo 6). Los sistemas de estrellas múltiples parecen haberse formado de la misma forma. En muchos casos, las componentes de una estrella múltiple parecen tener la misma edad. Con frecuencia vemos un sistema en el que ambas componentes son estrellas calientes de la clase espectral O, o son estrellas B recientes. ⩽ En la tabla III vemos que las componentes de Luyten 726-8 son las dos del tipo espectral M 6e; 61 Cygni A y B tienen tipos espectrales semejantes. ⩾ De acuerdo con los conceptos actuales sobre la evolución de las estrellas, esas componentes son de masa similar y se formaron al mismo tiempo a partir de una nebulosa primitiva; se encuentran ahora en la misma fase de evolución. A veces, una componente será una gigante roja, caliente, de la serie principal y su acompañante será una supergigante roja, relativamente fría. Podemos concluir que las masas de las dos estrellas eran diferentes al principio y que la supergigante representa la evolución más rápida de la componente de mayor masa. (Véase el capítulo 6.)

En los años recientes se ha descubierto una extraordinaria e importante ocurrencia de sistemas de estrellas binarias. Las estrellas masivas, jóvenes, calientes, por regla general tienen una velocidad aleatoria relativamente lenta, que suele ser inferior a los 10 km s^{-1}, ⩽ que corresponde a un movimiento propio pequeño. ⩾ Esas estrellas están concentradas hacia el plano galáctico, ⩽ puesto que son de reciente formación y se mueven con lentitud. ⩾ Son interesantes las excepciones a la regla; hay un número pequeño de estrellas masivas, calientes, que se mueven al azar con velocidades anormalmente

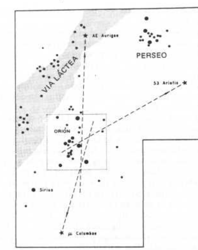


Figura 11-9. Trayectorias calculadas de las tres estrellas desertoras mejor conocidas. Obsérvese que divergen a partir de una región relativamente pequeña de la constelación de Orión. (Cortesía de Sky and Telescope, Cambridge, Massachussetts.)

altas, que a veces se acercan a los 100 km s^{-1}. Tales estrellas pueden haberse escapado de asociaciones estelares. En la figura 11-9 los puntos estrellados representan tres de esas estrellas calientes que se mueven con rapidez; las rectas a trazos representan las direcciones de sus movimientos por el cielo. Las tres rectas se cortan casi en la región de la constelación de Orión, en la que hay una gran asociación de estrellas calientes. Como se conocen sus velocidades y distancias a la asociación de Orión, se puede retroceder en el tiempo y establecer que estas estrellas desertoras salieron de la asociación de Orión hace unos 2 a 5 millones de años.

¿Por qué son estas estrellas expulsadas de sus cúmulos? El astrónomo holandés Adriaan Blaauw ha observado que estas desertoras son siempre estrellas sencillas –circunstancia anormal puesto que la multiplicidad está muy extendida entre las estrellas de tipo reciente. Según la hipótesis de Blaauw, las estrellas desertoras fueron previamente componentes de sistemas binarios, cuyas segundas componentes tuvieron que ser estrellas calientes, de

mucha masa, de la clase espectral O, que se convirtieron en supernovas del tipo II. (Véase el capítulo 7.)

Consideremos ahora qué sucedería si la componente de mayor masa de una estrella binaria desapareciera por completo repentinamente por la explosión de una supernova. Las fuerzas gravitatorias no sustentarían a la estrella restante en su órbita anterior a la explosión y se escaparía según una tangente a la misma, pero con velocidad igual a la que tuviera. Este efecto de "tiro de onda" –es difícil llamarle de otro modo– ≪ es análogo al caso de una piedra amarrada a una cuerda a la que se da vueltas alrededor de la cabeza y que, de repente, se suelta o rompe. ≫

Ahora bien, la masa de la estrella que explota no desaparece en realidad sin dejar rastro; el residuo de la supernova es una nebulosa en expansión con una masa aproximadamente igual a la de la estrella original. (Véase el capítulo 7.) Si esta nebulosa estuviera dentro de la órbita de la estrella superviviente, las fuerzas gravitatorias no se verían muy alteradas y la acompañante no se escaparía. Sin embargo, si fuera al revés, es decir, la estrella muy al interior de la nebulosa, el efecto gravitatorio de ésta sería pequeño. Para que tenga lugar el efecto de onda, para la mayoría de los restos de supernova es necesario que salgan de la órbita de la estrella superviviente en un tiempo considerablemente menor que el período de revolución. Una estrella binaria con componentes bastante separadas –digamos 10 a 20 U. A.– tendría períodos de revolución del orden de varios años y se cumpliría la condición para el efecto de onda. Para las estrellas suficientemente masivas, las velocidades orbitales tienen que ser, aproximadamente, de 100 km s^{-1}.

≪ Los acontecimientos que hemos estado describiendo serían de interés considerable para los hipotéticos habitantes de un posible planeta que diera vueltas alrededor de una estrella desertora. Al principio, en los buenos tiempos, tendrían dos soles brillantes en el cielo, uno cerca y el otro más lejos. Algunos días no tendrían noche porque habría en el cielo una estrella por encima de cada hemisferio. Cuando ambas quedaran en el mismo hemisferio, la noche reinaría en el otro. Las noches serían extraordinarias, porque las estrellas en un cúmulo estelar o asociación, están dispuestas con mucha más densidad que en nuestra región de la Galaxia.

≪ De repente, la estrella más alejada explota. Verdaderamente, las consecuencias biológicas de la explosión de una supernova cercana son formidables. (Véase el capítulo 7.) A menos que sea una civilización de gran avance científico la que habite nuestro imaginario planeta, todos sus habitantes morirían incinerados.

≪ Pero para proseguir con la narración, supongamos que nuestros observadores sobreviven de la explosión de la supernova. Poco después, la estrella restante y sus planetas acompañantes se embarcan en un viaje interestelar extraordinario, mudándose un parsec cada 10000 años. En menos de un millón de años, la estrella estaría bien lejos de la asociación estelar en que se formó y las noches, más frecuentes ahora, exhibirían un cuadro celestial mucho más mundano.

≪ Tenemos que hacer resaltar que esta narración es irreal en varios aspectos. Es de lo más improbable que existiera una civilización avanzada en un planeta así puesto que la propia edad del sol local, masivo y caliente, podría ser tan sólo de unos pocos millones de años –(véase el capítulo 6)–, que no llega apenas al tiempo para el origen de la vida y la evolución de una civilización científica. En el capítulo 24 volveremos a la cuestión de qué estrellas es probable que tengan sus propias civilizaciones planetarias. ≫

La presencia de enanas blancas en los sistemas de estrellas múltiples –por ejemplo en el sistema de Sirius (tabla III)– se explica por el hecho de que las componentes de mayor masa casi han terminado su historia evolutiva. Sin embargo, sería difícil imaginar un sistema binario que contuviera una estrella masiva, caliente, de la clase espectral O y a su vez una gigante roja con una masa una vez y media o dos veces la del Sol. Para dejar la serie principal y convertirse en gigante roja, una estrella de esa masa necesitaría de 2 a 4 mil millones de años. (Véase la tabla I.) Por otra parte, una estrella caliente del tipo espectral O, no puede permanecer en la serie principal por más de unos 10 millones de años. Por fortuna, los sistemas binarios tal como el que acabamos de describir son del todo desconocidos.

Así pues, los hechos parecen indicar que las componentes de los sistemas de estrellas múltiples se formaron simultáneamente. Si pudiéramos afirmar que la formación de los sistemas planetarios no se diferencia fundamentalmente de la de los sistemas de estrellas múltiples, entonces podríamos concluir que los planetas son coetáneos en su formación con la de sus estrellas primarias. El origen de los sistemas planetarios es el tema de los dos próximos capítulos.

12

Puntos de vista históricos sobre el origen del sistema solar

Pero, en realidad, toda la historia general de los cometas y planetas y la creación del mundo, está fundamentada sobre bases de tan poco valor e insignificantes, que a menudo me he maravillado de cómo un hombre ingenioso podría pasar todos los sinsabores para hacer que tales fantasías tengan cohesión. Por mi parte, estaré muy contencto y diré que he hecho algo grande, si puedo llegar no más que a saber algo de la naturaleza de las cosas, tal como son ahora, sin preocuparme nunca por lo que fueron al principio ni de cómo nacieron, sabiendo que esto está fuera del alcance del saber humano e incluso de suponerlo.

Christiaan Huygens, *Nuevas conjeturas respecto a los mundos planetarios, sus habitantes y formaciones* (1670).

Sobre una ligera conjetura me he aventurado en un viaje y ya contemplo las colinas a los pies de las montañas de nuevas tierras. Aquéllos que tengan ánimo para continuar la búsqueda posarán los pies en ellas.

Immanuel Kant, *Historia natural general y teoría del cielo* (1755).

Desde los tiempos más primitivos, la cuestión del origen y evolución de la Tierra y de los demás planetas de nuestro sistema solar ha retado a las inteligencias más preclaras. Filósofos y científicos de la talla de Kant y Laplace han tratado este problema y con todo, permanece casi todo él sin resolver.

En el último decenio, la teoría de la evolución estelar esbozada en el capítulo 6 ha ganado una amplia aceptación científica. A primera vista, parece extraño que los astrónomos sepan más acerca de estrellas remotas, que en muchos casos son difíciles de observar, que respecto a los planetas cercanos. Pero son muchas las estrellas que se pueden observar y se sabe que representan las fases de la evolución estelar. Hemos sido capaces de establecer empíricamente que la rapidez de evolución de una estrella depende de ciertas condiciones ideales –como, por ejemplo, de su masa. ≪ Dadas estas indicaciones por la observación, la tarea teórica se ha simplificado enormemente. En cambio, no disponemos de un cuerpo informativo semejante para la evolución planetaria. ≫ Si pudiéramos llegar a observar bien numerosos sistemas planetarios en distintas fases de desarrollo, también podríamos resolver empíricamente las cuestiones respecto a su evolución.

¿Se deduce de esto que no podemos decir absolutamente nada respecto al origen de nuestro sistema solar, excepto que se formó de algún modo hace no más de 5 mil millones de años? Un punto de vista así, tan impasible, es una especulación censurable e infinita. El progreso de la cosmogonía estelar nos ha proporcionado pistas importantes para la cosmogonía planetaria. Además de las pruebas de las observaciones del capítulo precedente, existen hoy argumentos científicos que sustentan la suposición de que muchas estrellas tienen sistemas planetarios. ≪ En este capítulo consideraremos brevemente algunos de los primeros puntos de vista sobre el origen del sistema solar y, en el próximo, las hipótesis actuales.

≪ Una de las tentativas más antiguas para explicar el origen del mundo en términos científicos –en tanto cuanto por ciencia se entendía en aquel tiempo– fue la de Lucrecio en su "De rerum natura" (1). Lucrecio jugaba con la idea de que el universo era infinitamente viejo y que en él siempre había habido materia. Pero imaginó un tiempo anterior al origen de las *cosas*; había materia, pero no de forma organizada. La materia, naturalmente,

1.- N. del T. Titus Lucretius Carus, siglo I a. J.C. De rerum natura, "De la naturaleza de las cosas", poema dividido en seis libros, basado en la física epícurea de los átomos. En el quinto libro habla del origen de la Tierra, de los animales y del hombre.

del movimiento orbital de los planetas alrededor del Sol y de la rotación de éste y de los planetas sobre sus respectivos ejes. ≪ Pero la contribución de la rotación planetaria es despreciable comparada con la de la revolución planetaria y la del Sol. La cuestión importante respecto al momento cinético es que, como la energía, es una cantidad conservativa. En un sistema aislado, lo mismo que la energía total permanece constante, también permanece constante el momento cinético. Puesto que sabemos calcular el momento cinético del sistema solar, podemos tener cierta idea de su valor en la época de su formación, siempre que, como antes, sea correcto considerar al sistema solar como un sistema aislado. ≫

El momento cinético orbital de un planeta se mide con respecto al centro de gravedad del sistema, que está muy cerca del centro del Sol. Se define como el producto de la masa del planeta, m, por su velocidad de revolución alrededor del Sol, v y por su distancia r al centro de rotación, es decir, al Sol. En el caso de un sólido esférico en rotación, de densidad uniforme, el momento cinético respecto al eje que pasa por su centro es igual a 0,4 MVR, siendo M la masa del sólido, V su velocidad ecuatorial y R su radio. ≪ Obsérvese que intencionadamente estamos distinguiendo entre revolución y rotación por las minúsculas y mayúsculas, respectivamente. ≫

La masa de todos los planetas en conjunto es sólo, más o menos, 1/700 de la masa solar. Por otra parte, la distancia de los planetas al Sol es mucho mayor que el radio de éste y muchos planetas tienen velocidades de revolución alrededor del Sol que son mucho mayores que la propia rotación del mismo. Por ejemplo, la velocidad de la Tierra en su órbita es de unos 30 km s^{-1}, mientras que la de rotación del Sol en su ecuador es sólo de unos 2 km s^{-1}. Cuando consideramos estas cifras, vemos que el 98 por ciento del momento cinético del sistema solar procede de los movimientos orbitales de los planetas y sólo el 2 por ciento de la rotación del Sol sobre su eje. En la figura 12-2 vemos la distribución del momento cinético entre el Sol y los planetas.

En Física, las masas suelen expresarse en gramos, las distancias en centímetros y el tiempo en segundos. ≪ Así, las unidades del momento cinético, producto de masa por velocidad y por distancia, serán g cm^2 s^{-1}. ≫ Llamemos I al momento cinético de Júpiter. Su masa m es igual a 2×10^{30} g (como 10^{-3} la masa del Sol). La distancia de Júpiter al Sol r, es de $7{,}8 \times 10^{13}$ cm (ó 5,2 U.A.). La velocidad orbital de Júpiter, v, es de $1{,}3 \times 10^6$ cm s^{-1} (13 km s^{-1}). Por lo tanto, el momento cinético de revolución es $I = mvr = 2 \times 10^{50}$ g cm^2 s^{-1}. ≪ Por otra parte, la masa del Sol es de 2×10^{33} g; su velocidad ecuatorial es de unos 2×10^5 cm s^{-1} y su radio ecuatorial es de unos 7×10^{10} cm. El Sol no es del todo un cuerpo sólido, pero para nuestro objeto sera suficientemente exacto hacer el momento cinético del Sol igual a 0,4 MVR. Nos podemos autoconvencer fácilmente de que el momento cinético de la rotación del Sol es sólo de unos 1×10^{49} g cm^2 s^{-1}. Así, Júpiter, que sólo tiene 10^{-3} la masa solar, tiene 20 veces más momento cinético que el Sol. La cifra real, basada en cálculos más exactos, es unas 50 veces mayor. ≫ De la figura 12-2 resulta evidente que los planetas terrestres –Mer-

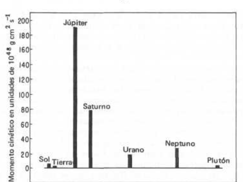


Figura 12-2. Representación esquemática de la distribución del momento cinético en el sistema solar. A pesar de su mucha mayor masa, el porcentaje de momento cinético correspondiente al Sol es muy pequeño respecto al total del sistema solar.

curio, Venus, la Tierra y Marte– tienen un momento cinético total combinado, que es unas 380 veces menor que el de Júpiter. Así pues, la "tajada del león" del momento cinético del sistema solar está concentrada en los movimientos orbitales de los planetas gigantes, Júpiter y Saturno.

Esta circunstancia es totalmente incomprensible desde el punto de vista de la hipótesis nebular de Kant-Laplace. Según la misma, las velocidades angulares de un anillo dado y de la nebulosa en contracción tienen que ser casi idénticas. Cuando el anillo se separó de la nebulosa, tenía aproximadamente el mismo momento cinético por unidad de masa que la porción que continuaba contrayéndose para formar el Sol. Pero como la masa de la parte destinada a formar el Sol era mucho mayor que la del anillo protoplanetario, el momento cinético que finalmente se establece en éste tiene que ser mucho mayor que en los planetas si es que tiene que conservarse el momento cinético. La hipótesis de Kant-Laplace carece de medios para transferir el momento cinético del protosol al anillo. ≪ Así pues, esta teoría que era prometedora en otros aspectos tropezó con el inconveniente del momento cinético. ≫

A la hipótesis nebular sucedieron otras suposiciones. ≪ Comentaremos solamente una de ellas: la hipótesis de la colisión en la forma enunciada por el astrónomo inglés Sir James Jeans. Es de interés histórico y filosófico. ≫ La hipótesis de Jeans fue recibida con gran aceptación en el primer tercio de este siglo ≪ y todavía se habla de ella con cierta reverencia en enciclopedias sin prestigio y en algunos libros de texto escolar rurales de los Estados

En 1928, el astrónomo ruso-americano Otto Struve y el soviético G. A. Shajn resolvieron este problema. La figura 13-1 muestra esquemáticamente los espectros de tres estrellas calientes, J Hércules, η Ursae Majoris y HR 2142. Las tres rayas más intensas que observamos en ellos surgen de las transiciones del hidrógeno y helio neutros. La comparación del espectro superior con el del centro, pone de manifiesto que las rayas del hidrógeno (H_γ) tienen más o menos el mismo ancho en los dos, mientras que las del

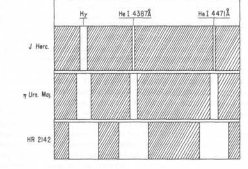


Figura 13-1. Ensanchamiento de franja en el espectro de tres estrellas, que muestra los efectos del aumento de la velocidad de rotación ecuatorial. (Esquema tomado de los espectros fotográficos de Struve y Shajn.)

helio son apreciablemente más anchas y más difusas en el del centro que en el superior. En el espectro inferior, todas las rayas son muy anchas y difusas; hasta el punto que resultan casi invisibles ≪ y tienen que observarse con detenimiento en la placa fotográfica original para poder determinar sus anchos. ≫ La interpretación de estos espectros es sencilla. En el superior, la velocidad de rotación respecto a la visual es casi nula, es decir, que la estrella gira muy lentamente o que, –caso fortuito– su eje de rotación está casi en prolongación de la visual. El ancho de la raya del hidrógeno se puede explicar por motivos que nada tienen que ver con la rotación estelar. ≪ En el espectrograma del centro, la raya del hidrógeno no es apreciablemente más

ancha, pero sí lo suficiente para que no influya en ella la rotación de la estrella. ≫ Sin embargo, las del helio indican una velocidad de rotación de aproximadamente 210 $km\ s^{-1}$. En el espectro inferior, la velocidad de rotación es tan grande –aproximadamente de 450 $km\ s^{-1}$– que todas las rayas, incluso la del hidrógeno H_γ están muy ensanchadas y aparecen borrosas.

Actualmente se están investigando las velocidades de rotación de gran número de estrellas; los datos de que se dispone indican que las velocidades difieren grandemente de una estrella a otra y ≪ una cuestión vista por primera vez por Otto Struve ≫, existe cierta relación entre la velocidad de rotación y el tipo de espectro. Las estrellas masivas, calientes, giran muy deprisa; las enanas amarillas y rojas de la serie principal, apenas si giran. La velocidad del Sol en su ecuador es sólo de unos 2 $km\ s^{-1}$. En la tabla IV se presentan los datos de la velocidad de rotación de estrellas de tipos espectrales distintos. Las meticulosas observaciones espectroscópicas han demostrado –y se refleja en la tabla– que cerca de la clase de espectro F2, desciende de forma característica y abrupta la velocidad de rotación. La temperatura superficial de una estrella F2 es de unos 7000 K, ≪ aproximadamente 1000 K superior a la del Sol. ≫ ¿Cuál es el origen de esta discontinuidad de F2? ≪ ¿Por qué las velocidades de rotación de las estrellas descienden del todo hacia los últimos tipos de espectros?

≪ En sí, no hay nada extraño respecto a la variación de la velocidad con el tipo de espectro. ≫ Otras características fundamentales de las estrellas, como por ejemplo, luminosidad y temperatura superficial, varían uniformemente de las estrellas de los primeros tipos a los últimos. ≪ Struve ha procurado responder al problema de la discontinuidad de F2; respuesta que como mejor se entiende es expresada en los siguientes términos: ≫ Imaginémonos que todos los planetas del sistema solar están incorporados de algún modo dentro del Sol. Puesto que en un sistema aislado tiene que conservarse el momento cinético (2), esa fusión imaginaria entre el Sol y los planetas haría que éste girara mucho más deprisa. ≪ Pero como los planetas representan solamente una pequeña fracción de la masa total del Sol, la fusión cambiaría la masa de éste sólo en una cantidad despreciable.

Por otra parte el momento cinético de los planetas es tan grande ≫ que el Sol, en esas circunstancias, tendría que girar unas 50 veces más deprisa a como lo hace, puesto que su momento cinético tendría que pasar de su 2 por ciento actual al 100 por cien total del momento cinético del sistema solar.

2.- N. del T. Se entiende por momento cinético el producto de la cantidad de movimiento (masa por velocidad) de un cuerpo en rotación por el radio al centro de gravedad, que resulta igual al producto del momento de inercia de dicho cuerpo respecto a su eje de rotación por su velocidad angular. En América latina se conoce más con el nombre de momento angular.

En este caso el Sol tendría que girar con una velocidad ecuatorial de unos 100 km s^{-1} y ésta es precisamente una velocidad típica de las estrellas que son más masivas y calientes que las del tipo espectral F2. Así pues, al menos es una hipótesis razonable el que la velocidad del Sol es pequeña porque por alguna razón ha pasado parte de su momento cinético a los planetas.

≪ ¿Qué hay, pues, respecto a las otras estrellas con tipos espectrales posteriores al F2? Si nuestra hipótesis es correcta, suponemos que giran despacio porque también habrán transferido momento cinético a sus respectivos sistemas planetarios. Consideremos las consecuencias de este resultado. En realidad, estamos llegando a la conclusión de que casi todas las estrellas de tipo espectral posterior al F2 van acompañadas de sistemas planetarios. Pero el 93 por ciento de las estrellas del cielo de la serie principal, son posteriores a F2. La mayoría de las restantes son gigantes, supergigantes, enanas blancas y acompañantes oscuras. Todas, excepto quizá las acompañantes oscuras, han pasado por una fase evolutiva de la serie principal. Así pues, a partir del ancho de las rayas de las placas espectrales hemos llegado a la notable conclusión siguiente: ¡La Galaxia está llena de planetas! ≫ Como esta deducción, evidentemente, es de gran importancia, hemos de convencernos de que las estrellas no pueden perder momento cinético por otros medios, por ejemplo, transfiriéndolo al gas interestelar. Dicho de otro modo, hemos de demostrar que una estrella en rotación, sin planetas, es un sistema aislado,

Tabla IV

Relación entre velocidad de rotación y tipo de espectro

Velocidad de rotación ecuatorial estelar (en km s^{-1})	*Porcentaje de estrellas de un tipo espectral determinado con velocidades de rotación en los intervalos de la columna de la izquierda*					
	Oe, Be	O,B	A	F0–F2	F5–F8	G, K, M
0–50	0	21	22	30	80	100
50–100	0	51	24	50	20	0
100–150	0	20	22	15	0	0
150–200	1	6	22	4	0	0
200–250	3	2	9	1	0	0
250–300	18	0	1	0	0	0
300–500	78	0	0	0	0	0

es decir, que cumple el principio de conservación del momento cinético. ¿Cómo podemos demostrarlo?

Consideremos en primer lugar el caso de las gigantes rojas. Una gran mayoría de las gigantes se caracterizan por su rotación ecuatorial relativamente elevada. Por ejemplo, la estrella ξ (letra xi griega) Geminorum es del tipo espectral F5 y tiene una velocidad de rotación de 73 km s^{-1}. Esta gigante roja clásica (en realidad debería llamarse gigante amarilla) es una estrella muy vieja de acuerdo con las teorías contemporáneas de la evolución estelar. (Véase el capítulo 6.) Cuando pertenecía a la serie principal, su espectro era de tipo A. (Véase la trayectoria evolutiva de la figura 6-3.) ≪ Podemos comparar el radio acual de ξ Geminorum con el de una estrella A típica de la serie principal. ≫ Cuando aquella era una estrella de la serie principal, su radio tuvo que haber sido alrededor de la mitad del actual y si ha conservado el momento cinético a lo largo de su evolución a la fase de gigante roja, su velocidad ecuatorial como estrella A de la serie principal tenía que ser de 146 km s^{-1}. En la tabla IV vemos que ésta es una velocidad de rotación característica de las estrellas de la serie principal de tipo espectral A. Así pues, podemos convenir que se ha conservado el momento cinético de ξ Geminorum durante su evolución fuera de la serie principal.

Veamos ahora otro ejemplo. ≪ Existe una clase de estrellas que se asemejan a su prototipo, T Tauri, la tercera estrella variable descubierta en la constelación Tauri (del Toro). ≫ Las estrellas T Tauri pertenecen al tipo espectral G y tienen velocidades de rotación bastante altas, hasta de 100 km s^{-1}. Se cree que son muy jóvenes – todavía en estado de contracción por gravedad (capítulo 6), que todavía no han entrado en la serie principal. Estas estrellas se encuentran característicamente a la derecha y un poco por encima de la serie principal en el diagrama de espectro-luminosidad. (Véase la figura 6-2.) Con el paso del tiempo se acortan sus radios. Parece, pues, que de aquí a unos millones de años, cuando terminen la contracción, las estrellas T Tauri entrarán en la serie principal aproximadamente por el espectro tipo A. En el transcurso de tal contracción sus radios decrecen a razón aproximada de 2. Por tanto, si conservan el momento cinético durante la contracción, su velocidad ecuatorial de rotación cuando entren en la serie principal, tendrá que ser de unos 200 km s^{-1}. De nuevo vemos en la tabla IV que ésta es una velocidad ecuatorial de rotación típica de las estrellas de la serie principal de espectro tipo A. Luego, parece que tanto al principio como en las últimas fases de la evolución estelar se conserva el momento cinético.

No obstante, tenemos que hacer resaltar que los resultados de estos ejemplos están basados en las teorías contemporáneas sobre la evolución de las estrellas. Las coincidencias que hemos hallado no constituyen pruebas *rigurosas* de la conservación del momento cinético durante la evolución. En realidad, ahora veremos que al menos hay una posibilidad de que se pierda el momento cinético con independencia de la existencia de un sistema planetario.

El físico sueco Hannes Alfven (3), del Real Instituto de Tecnología de Estocolmo, fue el primero en considerar el problema de la transferencia de momento cinético de las estrellas a los planetas y demostró que un campo magnético podía ser el medio para la misma. El criterio de Alfven lo incorpora el astrofísico inglés Fred Hoyle, de la Universidad de Cambridge, a su teoría del origen del sistema solar. Creemos que la hipótesis de Hoyle es la más prometedora de las propuestas hoy día y, por tanto, nos detendremos en ella para considerar sus principios básicos.

Siguiendo una tradición, ahora clásica, Hoyle representa los planetas formados a partir de una nebulosa fría de gas y polvo. En su inicio, la densidad de la nebulosa era muy pequeña. Las distintas regiones de la nube se movían a distintas velocidades respecto unas de otras. Por analogía con las nebulosas gaseosas, Hoyle supone que esas velocidades eran del orden de 1 km s^{-1}.

Como resultado de tales movimientos, la nebulosa inicial tuvo que tener un momento cinético, pequeño, pero definido. Además la nube tuvo que haber tenido dimensiones interestelares, de varios años luz de un lado al otro. Así pues, si en el proceso de condensación de dimensiones estelares a solares, se hubiera conservado el momento cinético, la velocidad ecuatorial final de la estrella recién formada habría sido casi igual a la velocidad de la luz y éste no es el caso, como hemos visto. Por tanto, hemos de suponer que la nebulosa perdió más del 99 por ciento del momento cinético inicial durante la formación de la estrella. Según Hoyle, esa pérdida puede explicarse por los campos magnéticos interestelares. ⩽ Al principio, la nube y el medio interestelar compartían el mismo campo magnético y podemos imaginarnos líneas de fuerza magnética uniendo la nebulosa en contracción con la materia del medio interestelar. A medida que la nebulosa gira más deprisa, debido a su contracción, las líneas de fuerza hacen que aumente la rotación del medio interestelar exterior a aquélla, ⩾ con lo cual inician el paso de momento cinético de la nebulosa al medio interestelar circundante. Las líneas de fuerzas hacen las veces de ballestas flexadas, pero por una razón que no vamos a comentar aquí, tal transferencia de momento cinético sólo puede tener lugar mientras sea pequeña la densidad de la nebulosa. Cuando llega a cierto valor, ⩽ que aumenta por la contracción ⩾, cesa la transferencia de la nube al medio.

⩽ (El movimiento colectivo de las partículas cargadas en campos magnéticos, es una rama nueva de la física denominada magnetohidrodinámica. La hipótesis de que se frenó la rotación solar por la transferencia de momento cinético por las líneas de fuerza magnética, es un ejemplo de la aplicación

3.- N. del T. Premio Nobel de Física de 1970, compartido con Louis Néel.

de la magnetohidrodinámica a la astronomía. Dado que los campos magnéticos están dispersos en el universo y que los átomos ionizados influidos por los campos magnéticos son comunes, la magnetohidrodinámica tiene también muchas otras aplicaciones en astronomía.) ⩾

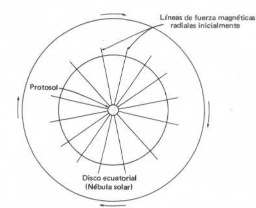


Figura 13-2. Fase primitiva de la evolución del sistema solar, según Hoyle. El Sol en contracción ha lanzado un disco ecuatorial de gas y polvo que está unido a él por líneas de fuerza magnética.

Esta teoría tiene amplias implicaciones. Tal como indican los cálculos efectuados por Hoyle, el momento cinético resultante, si se concentrara únicamente en la estrella en condensación, correspondería a una velocidad de rotación ecuatorial de varios cientos de kilómetros por segundo. Como hemos visto, esa es justamente la velocidad de rotación de las estrellas calientes. No obstante, la teoría no explica la rotación lenta de las estrellas relativamente más frías, como es el caso del Sol. Hemos de suponer que esas estrellas pierden momento cinético después de la contracción de la nebulosa inicial a dimensiones relativamente pequeñas, digamos a las dimensiones del sistema solar.

Por lo tanto, nos quedan dos incógnitas por resolver: ¿Por qué las estre-

llas de tipo espectral posterior al F2 pierden casi todo su momento cinético rotatorio? ¿Por qué no afecta esta pérdida a las estrellas más calientes?

Para resolverlas, observamos que cuando una nebulosa se contrae gira cada vez más deprisa alrededor de su eje. Llamamos protoestrella a la nebulosa en contracción. Con las velocidades iniciales de rotación supuestas por Hoyle, cuando con el tiempo una protoestrella de masa igual a la del Sol se

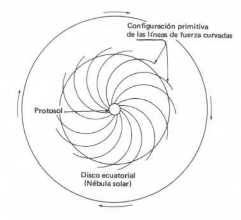


Figura 13-3. Fase algo más avanzada de la evolución del sistema solar, según Hoyle. El momento cinético está pasando por las líneas de fuerza magnética, del protosol que gira rápidamente al disco ecuatorial.

contrae hasta un radio de 40 radios solares (unas 0,2 U.A.), según Hoyle, girará tan rápidamente que la fuerza centrífuga en el ecuador equilibrará a la de gravedad. A partir de ese momento se produce un estado de inestabilidad y la protoestrella lanza material que forma un disco ecuatorial.

Hasta este punto, la teoría se corresponde con la clásica de Laplace. Recordemos que en la teoría de éste el problema principal se refiere a la transferencia de momento cinético de la protoestrella al disco que luego

se condensa y forma los planetas. Hoy día suponemos encontrar campos magnéticos en las protoestrellas en condensación. Cuando el disco ecuatorial de gas se separa de la protoestrella, es probable que existan líneas de fuerza magnética que lo conectan con ésta (figura 13-2). Pronto la protoestrella en contracción gira más deprisa que el disco y las líneas de fuerza que los conectan, rectas inicialmente, se curvan ahora (figura 13-3) y, como resultado, la rotación de la protoestrella se ve efectivamente frenada y el disco algo forzado a alejarse de la protoestrella. Con el tiempo, debido al rozamiento interno, aumentará el ancho del disco y parte de su materia se condensará en planetas. De este modo, los planetas son depósitos de la fracción principal del momento cinético nebular inicial perdido por la protoestrella.

¿Por qué este proceso sólo ocurre en las protoestrellas destinadas a tener en la serie principal tipos de espectro posteriores al F2? ≪ La protoestrella y el disco están –recordémoslo– unidos por líneas de fuerza magnética que inicialmente son radiales, como en la figura 13-2. Cuando aquélla continúa contrayéndose y girando más deprisa, las líneas de fuerza magnética tienden a curvarse alrededor de su periferia (figura 13-3). El momento cinético se transfiere por las líneas de fuerza al disco, que también gira más deprisa, evitando así velocidades de rotación muy elevadas en la protoestrella. Es evidente que cuanto más masivo sea el disco, más difícil le resultará acelerarse por las líneas curvadas de fuerza magnética. ≫ Sin embargo, la masa del disco no es muy grande, por lo cual, las líneas de fuerza magnética no se curvarán mucho a su alrededor. Estas líneas curvas enlazan con las capas exteriores de la protoestrella, que se caracterizan por el movimiento turbulento y desordenado de su masa.

Se cree que estas capas exteriores, turbulentas, se originan de la manera siguiente. Las temperaturas en el interior de la estrella son, claro está, muy superiores a las de las superficies radiantes de la misma. El hidrógeno que se ioniza en el interior caliente, se convierte en gas neutro en las capas exteriores. ≪ La transición de la región ionizada a la neutra es bastante brusca y conduce a la inestabilidad mecánica y a la formación de una zona turbulenta compuesta principalmente de hidrógeno neutro en las capas más altas de la atmósfera estelar. ≫ Con una zona de convección de hidrógeno profunda, como la que se encuentra en las estrellas frías, las líneas de fuerza magnética, que actúan como si estuvieran pegadas al gas animado, pueden quedar muy empotradas en la atmósfera de una protoestrella. Sin embargo, en una caliente, el hidrógeno continuará ionizado hasta bastante cerca de la superficie y su zona de convección será pequeña o no existirá. En este caso, las líneas de fuerza del campo magnético no penetrarán profundamente en la estrella sino que se curvarán hacia las capas superficiales. ≪ La masa de la poco profunda zona de convección de hidrógeno de una protoestrella caliente será muy pequeña y las líneas de fuerza que se curvan, según Hoyle, no podrán transferir una cantidad apreciable de momento cinético al disco protoplanetario más masivo. ≫

Hoyle explica así el descenso brusco de las velocidades de rotación estelares próximas al espectro tipo F2 en función de la dependencia de la ionización del hidrógeno sobre la temperatura. En las estrellas del tipo espectral FO, en las que la temperatura de las capas superficiales es sólo unos 1000° mayor que en las estrellas del tipo espectral F2, la zona de convección empieza tan cerca de la superficie de la estrella, que las líneas de fuerza magnética tan sólo están ligeramente inmersas en la atmósfera estelar. ≪ En este caso, la rotación angular de la protoestrella no se verá frenada magnéticamente y resultará una estrella de la serie principal de velocidad de rotación relativamente alta. Sin embargo, obsérvese que una protoestrella destinada a ser una estrella de la serie principal, de espectro FO, puede proyectar un disco protoplanetario durante su proceso de formación. No hemos descartado la posibilidad de que ese disco formado alrededor de estrellas calientes se condense a su vez y forme planetas. Los argumentos de Hoyle sostienen la hipótesis de que todas las estrellas de los últimos tipos han transferido momento cinético a discos protoplanetarios, pero por cuanto sabemos, la reducción de tales discos a planetas no tiene que ser sencilla.

≪ El pensamiento actual respecto a los procesos de condensación se enfoca según dos principios. En el primero –un proceso gravitatorio sugerido por G. P. Kuiper– se supone que la densidad local de la nebulosa es tan grande, que la mutua atracción gravitatoria de la materia contigua lleva a una ulterior condensación hasta que se forman objetos de masa planetaria. La densidad inicial de la nebulosa ha de ser lo suficientemente grande para que las fuerzas periódicas del Sol no separen con su atracción las condensaciones recién formadas. Las clásicas mareas de los mares de la Tierra se deben, en parte, a que el Sol y la Luna atraen con más fuerza a la masa fluida de los océanos –algo más cerca de ellos– que al suelo subyacente. No obstante, la fuerza mutua de atracción gravitatoria entre los océanos y la Tierra es mucho mayor que las fuerzas que provocan las mareas, razón por la cual no vuelan al espacio diariamente las aguas de los mares. Pero, a menos que la densidad de la nebulosa solar fuera más bien grande, las condensaciones no se mantendrían unidas por gravedad y, a falta de otras influencias, la inestabilidad de la fuerza periódica evitaría la formación de los planetas. Este argumento es original del físico escocés James Clark Maxwell.

≪ El segundo principio, propuesto por el cosmoquímico americano Harold C. Urey y otros, de la Universidad de California, se basa en los enlaces químicos débiles entre partículas materiales colisionantes. En efecto, se supone que los condensados en la nebulosa primitiva son pegajosos. La idea no es muy distinta a la de Lucrecio.

≪ Es evidente que si la nebulosa tuviera temperaturas muy altas, los gases desaparecerían por ebullición, los condensados se evaporarían y resultaría difícil la formación continuada de planetas. La creencia general es que la condensación ocurrió a temperaturas bajas, quizá tan sólo de unas pocas decenas de grados por encima del cero absoluto. Y con todo, cuando el Sol se contraía hacia la serie principal, su luminosidad era tan alta. (Véase la figura 6-2.) Esta paradoja aparente entre las teorías de los orígenes del Sol y del sistema planetario es posible que pueda resolverse si imaginamos una absorción importante de la radiación solar por el polvo de las partes interiores de la nebulosa solar de modo que apenas se calentó la nebulosa en general, o bien que la mayor parte de la condensación planetaria se completó antes de que la luminosidad del protosol se hiciera muy grande.

≪ Un posible inconveniente del principio de la condensación gravitatoria es que las densidades nebulares requeridas conducen a masas muy grandes; en consecuencia, los protoplanetas en fase de condensación tuvieron que haber sido mucho más masivos de lo que son en la actualidad y hay que suponer algún proceso de disipación del grueso de su masa. Tal fuga de masa podría haber tenido lugar si en aquellos primeros tiempos hubiera habido un flujo intenso de partículas cargadas emitidas por el Sol.

Por el principio de acrecentamiento químico resultan adecuadas densidades mucho menores y se evitan los problemas de la disipación de masa. ≪ La cuestión del escape de los gases ligeros al comienzo de la historia del sistema solar es fundamental. Prescindiendo de las temperaturas en las capas superiores de las atmósferas protoplanetarias, la disipación tropieza con serios problemas que el primero que los puso de manifiesto fue Shklovskii. ≫

El contenido químico de los planetas es claramente diferente al del Sol. Si añadiéramos hidrógeno y helio a las masas de los planetas hasta que estos elementos estuvieran presentes en proporciones cósmicas, la masa total de todos los planetas sería como unas diez veces mayor que la actual, es decir, los planetas abarcarían un pequeño porcentaje de la masa solar, masa comparable a la de las estrellas acompañantes invisibles de las que se habló en el capítulo 11. Es concebible que las acompañantes de masa menor de los sistemas de estrellas binarias se hayan formado por procesos semejantes a los que condujeron a la formación de los planetas. La diferencia quizá sea que cuando se formaron los planetas, el exceso de hidrógeno y de helio se evaporó al espacio interestelar, mientras que en la formación de las estrellas acompañantes oscuras, los elementos ligeros permanecieron unidos por fuerzas de gravedad.

Consideremos ahora una objeción más seria a la teoría de Hoyle. De la existencia de campos de fuerza magnética surge la posibilidad de que se pierda el momento cinético incluso sin formación de planetas. Se sabe que el Sol emite corrientes de partículas cargadas ≪ –el llamado viento solar, que procede de la atmósfera solar y ocupa el espacio interplanetario. ≫ Nubes definidas de gas ionizado, caliente, se arrojan desde las proximidades de las manchas solares (figura 1-3) a velocidades de varios cientos y hasta miles de kilómetros por segundo. Este material ionizado es un excelente conductor de la electricidad y recorre, por tanto, las líneas de fuerza del campo magnético solar. A grandes distancias del Sol, esas líneas de fuerza magnética son casi de dirección radial, ≪ como los alfileres en un acerico. ≫ Moviéndose a

lo largo de las líneas de fuerza, las nubes ionizadas de viento solar pueden ser arrojadas a varias decenas de radios solares de la superficie del Sol.

Las líneas de fuerza magnética giran alrededor del eje del Sol a la misma velocidad de rotación que las capas superficiales. Nos podemos imaginar las líneas de fuerza como una estructura metálica rígida unida a una esfera en rotación. Así pues, las nubes de gas arrojadas por el Sol aumentarán su momento cinético a medida que se vayan alejando siguiendo las líneas de fuerza, ≪ porque -recordémoslo- el momento cinético de revolución es proporcional a la distancia al Sol. ≫ Si a grandes distancias, donde los campos magnéticos son muy débiles, las nubes pueden desprenderse -escaparse- de las líneas de fuerza, en tal caso, cantidades apreciables del momento cinético se perderían en el espacio interestelar.

≪ El astrofísico francés Evry Schatzmann, del Observatorio de París, ha expresado ideas análogas. ≫ Supongamos, por ejemplo, que las nubes de gas se escapan característicamente a una distancia de 30 radios solares de la superficie del Sol. En tal caso, para perder casi todo su momento cinético inicial, el Sol ha de arrojar solamente como un 0,1% de su masa y cabe en lo posible esa pérdida relativamente pequeña a lo largo de los miles de millones de años de su evolución. En el momento actual, la velocidad de rotación del Sol no se ve frenada por la pérdida de momento cinético por la proyección de nubes de gas ionizado, porque la pérdida que ello supone en forma de viento solar es muy pequeña. Pero es posible que, quizá en el pasado, fuera mayor la pérdida.

Así pues, si bien la lenta rotación de las estrellas de tipo espectral posterior a F2 induce con insistencia a que esas estrellas vayan acompañadas de sistemas planetarios, las pruebas no son concluyentes. Existe otra posibilidad y otra hipótesis admisible -la pérdida de momento cinético al medio interestelar- que no relaciona la rotación planetaria con la rotación estelar.

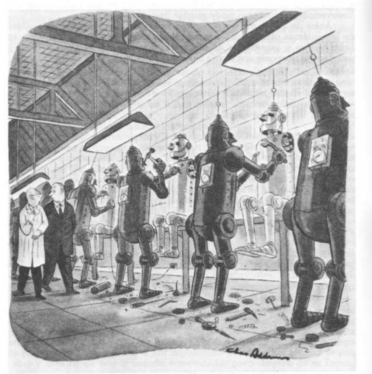
≪ Además de las hipótesis que hemos mencionado, en los años recientes se han propuesto otros puntos de vista de la cosmogonía planetaria. ≫ Por ejemplo, el científico soviético O. Y. Schmidt no creía que el Sol hubiera tenido nunca una nube de gas y polvo a partir de la cual se formaron luego los planetas. ≪ Se imaginaba al Sol capturando una nube interestelar de gas, polvo y objetos de mayor tamaño acrecentados poco después de su formación. ≫

Sin embargo, el proceso de captura es muy improbable; además, las investigaciones de los últimos años indican, como hemos visto, que los procesos de formación de las estrellas y de los planetas están en íntima relación.

Recientemente, el astrónomo inglés W. H. McCrea, del Royal Holloway College, ha propuesto una hipótesis cosmogónica de carácter puramente mecánico, que no considera los fenómenos electromagnéticos. Aunque la hipótesis de McCrea explica el porqué el momento cinético tiene que concentrarse en los movimientos orbitales de los planetas, no explica el brusco descenso de la velocidad de rotación estelar cerca del tipo espectral F2.

≪ La ventaja de la hipótesis del freno magnético es que explica estas dos observaciones que de otro modo quedan desconectadas. ≫

Antes de que llegue a resolverse definitivamente el problema del origen de los sistemas planetarios, hay que llevar a cabo mucha investigación en física teórica y astronomía de observatorio. No obstante, se ha iniciado y levantado el marco de una teoría bien estructurada.



A veces me pregunto: ¿No acabará nunca?

11

Vida en el Universo

Un hombre que es de la opinión de Copérnico, de que esta tierra de nuestro planeta, redondeada e iluminada por el Sol, como el resto de los planetas, no puede por menos que pensar a veces que es probable que el resto de los planetas tengan su ropaje y accesorios y quizá sus habitantes también al igual que esta tierra nuestra.

. . . Pero quizá digan que no nos incumbe ser tan curiosos e inquisidores sobre estas cosas que el Creador Supremo parece haber guardado para su Propio Conocimiento. Puesto que El no ha querido hacer ningún descubrimiento o revelación, parece un tanto presuntuoso hacer cualquier indagación sobre lo que El ha considerado oportuno ocultar. Pero a esos caballeros se les podría decir que se tienen en mucho cuando pretenden señalar hasta dónde ningún otro hombre llegará en su búsqueda y fijar límites a la industria de otros hombres, como si ellos conocieran los hitos que Dios ha fijado al conocimiento, o como si los hombres fueran capaces de pasar esas marcas. Si nuestros antepasados hubieran sido así de escrupulosos, podríamos seguir ignorando todavía la magnitud y forma de la Tierra o que hubiera un lugar como América.

Christiaan Huygens, *Nuevas conjeturas respecto a los mundos planetarios, sus habitantes y producciones* (1670)

14

Sobre la definición de la vida

. . . Para cualquier cosa viviente que ha alcanzado su desarrollo normal y que no está mutilada y cuya forma de generación no sea espontánea, el acto más natural es la producción de algo como sí misma. Un animal produce un animal, una planta una planta, para que, en cuanto su naturaleza lo permita, pueda participar de lo eterno y divino. Ese es el fin hacia el cual todas las cosas se esfuerzan, por cuya causa hacen cuanto su naturaleza les permite. . . . Dado que ningún ser viviente es capaz de participar de lo que es eterno y divino por continuación ininterrumpida (pues nada perecible puede permanecer para siempre indiviso e igual), trata de alcanzar ese fin del único modo que le es posible y el logro lo es en varias categorías; así que permanece no, efectivamente, el individuo idéntico, sino que continúa su existencia en algo como él - no numéricamente, sino específicamente. . .

Aristóteles, *De Anima*

. . . Finalmente, la vida puede explicarse inequivocadamente en términos físico-químicos. . . . Comemos, bebemos y nos reproducimos, no porque la humanidad haya llegado al acuerdo de que esto es conveniente, sino porque, como autómatas, estamos obligados a hacerlo.

Jacques Loeb, *Concepción mecanicista de la vida*, 1912

. . . Si la materia "muerta" ha dejado atrás esta curiosa vista de grillos chirriantes, gorriones cantores y hombres maravillosos, ha de ser sencillo incluso para el materialista más acérrimo, que la materia de que habla contiene fuerzas asombrosas, si no terribles y que no es posible sea, como ha dicho Hardy, "no más que una máscara muy usada por la Gran Faz que tras ella se oculta"

Loren Eiseley, *The Immense Journey*, 1946

⩽ El problema de sus propios principios ha intrigado al hombre desde la más remota antigüedad. De origen más reciente -y quizá todavía de mayor fascinación- es la cuestión de la vida en otros mundos fuera de la Tierra. Tenemos la dicha de vivir el momento en que por primera vez en la historia pueden enfocarse con rigor y en detalle esos atormentadores temas. El tener en nuestras manos la clave para estos antiguos enigmas es un triunfo de primerísima categoría; proclama una época de exploraciones y descubrimientos jamás sobrepasada en la historia de la humanidad.

⩽ Las cuestiones de la vida extraterrestre y el origen de la vida están entrelazadas. Pero antes de que podamos abordar cualquiera de las dos, hemos de tener algunos conocimientos generales sobre la naturaleza de los sistemas biológicos y, para ello, tropezamos con un inconveniente general y es que nuestro saber sobre biología está limitado esencialmente a un ejemplo. El funcionamiento interno de los organismos terrestres – desde los microbios hasta los hombres – es tan semejante en sus detalles biológicos, que resulta muy probable que todos los organismos sobre la Tierra hayan evolucionado a partir de un modelo único de origen de vida.

⩽ Son varias las observaciones en favor de esta hipótesis. Todos los organismos están compuestos de una o más células, cuya organización y funcionamiento muestran enormes similitudes. En la bioquímica de los aparatos fotosintéticos y respiratorios; en el comportamiento reproductivo minucioso de las células; en la ubicuidad de la molécula de DNA como material genético; en los detalles de la descomposición de los elementos para extraer energía; en la asimetría de las moléculas constituyentes; incluso en la microestructura de las membranas y flagelos y en la base molecular de los colores animales, los mismos materiales, los mismos métodos, empleados una y otra vez, repetidamente, en el vasto conjunto de plantas y animales al que nos referimos genéricamente como "vida en la Tierra".

⩽ Así pues, vemos de inmediato una razón de por qué el descubrimiento y descripción de vida extraterrestre atraen profundamente al biólogo. Podría entonces distinguir entre lo esencial y lo casual. Podría empezar a saber qué características de los sistemas biológicos terrestres tienen los del más allá porque *todo* ser viviente ha de tenerlas; cuáles son accidentes históricos, los resultados de concatenaciones de acontecimientos arbitrarios y aleatorios que pudieran en alguna parte haberse desarrollado a lo largo de sucesiones diferentes para dar como resultado distintas clases de sistemas biológicos. En otras ciencias, los conocimientos adquiridos dentro de la Tierra, se pueden comprobar fuera de ella, en el universo. Evidentemente, esta es una razón de por qué la física y la química son, en cierto sentido, ciencias "universales". Pero, por cuanto sabemos, la biología es estrictamente

mundana y provincial y quizá no conozcamos más que un caso especial entre las diversas biologías del universo.

≪ Dado que sólo tenemos un ejemplo, la cuestión de la definición de vida está rodeada de dificultades. Teniendo presente que nuestras conclusiones pueden carecer de la generalidad que deseamos, vamos a tratar de averiguar por todas partes qué es la vida en la Tierra. ¿Es la vida simplemente una organización de materia particularmente ingeniosa o existe algo más en ella? Cualquier criatura puede decir la diferencia que hay entre un perrillo vivo, un perrillo muerto y un perrillo de juguete. ¿Cuál es exactamente la distinción?

≪ En los tiempos primitivos, cuando era muy poco lo que se sabía respecto a la naturaleza de los sistemas vivientes, las actividades biológicas más rutinarias, tales como la germinación de una semilla o la floración de una planta, se atribuían a la intervención divina. En los primeros años de la revolución industrial, cuando los progresos en mecánica celeste llegaron a algo que se parecía a la comprensión completa de las posiciones y movimientos de los cuerpos celestes, surgió el concepto de que los sistemas biológicos no podían ser más que un caso particular de intrincado movimiento de relojería y cuando las primeras investigaciones no fueron capaces de desvelar dicho movimiento, inventaron una fantástica causa principal – la "fuerza vital". Esa fuerza vital fue una rebelión de la biología mecanicista, una explicación de todo lo que el mecanismo no podía explicar o para lo cual no podían hallarse mecanismos. Atrajo también a aquellos que se sentían humillados por la implicación de que no eran "nada más" que una colección de átomos; de que sus necesidades y supuesto libre albedrío no eran sino meras interacciones de un número extraordinariamente grande de moléculas, de forma que, aunque demasiado complejas para predecirlas, estaban – en principio – determinadas.

≪ Pero hoy, no hallamos pruebas de esa fuerza vital; en verdad, el concepto está muy mal definido, una especie de saco en el que meter todo lo que no sepamos explicar. El plan opuesto – que todos los sistemas biológicos están formados por átomos y nada más – ha demostrado ser una idea muy útil. Partiendo de esta concepción, una ciencia totalmente nueva de biología molecular ha hecho progresos pasmosos y alcanzado unos conocimientos fundamentales. Y no hay nada decepcionante en la idea de que no somos más que átomos. Por ello estamos relacionados con el resto del universo y si estamos hechos de la misma materia prima, más o menos, que todo lo demás, entonces, en alguna otra parte, puede haber cosas como nosotros. Somos un tributo para la sutileza de la materia.

Como el ilustre físico americano Richard P. Feynman, (1) del Instituto de Tecnología de California, expuso a la audiencia de una conferencia:

1.- N. del T. Premio Nobel de física de 1965 (compartido con J. Schwinger y J. Tomonaga) por sus investigaciones sobre las interacciones entre el campo electromagnético y el fotón. Gran teórico de la estructura atómica y de las partículas elementales.

> Si un pedazo de acero o unos cuantos cristales de sal, que constan de átomos uno junto a otro, pueden tener propiedades tan interesantes; si el agua – que no es más que esas pequeñas pompas, kilómetro tras kilómetro, sin cesar de la misma cosa sobre la Tierra – puede formar olas y espuma, sonar con estruendo y trazar extraños dibujos como si corriera sobre el cemento; si todo esto, toda la vida de una corriente de agua, puede no ser otra cosa que una acumulación de átomos *¿Qué más es posible?* Si en vez de disponer los átomos con un orden definido, una y otra vez, repetidamente, sin cesar, o incluso formando pequeñas masas de complejidad como el olor de las violetas, con diferentes clases de átomos ordenados de muchas maneras, cambiando continuamente, sin repetición. ¿Puede haber algo más maravilloso que este proceder (de la materia)? ¿Es posible que la "cosa" que se está paseando ante ustedes de un lado a otro, que les está hablando, sea un gran globo de esos átomos con una ordenación muy compleja. . . ?
> Cuando decimos que somos un montón de átomos, no queremos dar a entender que somos *simplemente* un montón de átomos, porque un montón de átomos que no se repite en cada uno podría tener las posibilidades que ustedes ven frente a sí mismos en el espejo.

≪ Consideremos un animal – cualquier animal – del modo más general que podamos. (Exactamente igual podríamos considerar una planta, pero los animales son más divertidos.) ¿Qué hace? Principalmente, no hace nada. Espera en un agujero, está tumbado en la hierba, flota aguas abajo o se balancea en el porche. De vez en cuando hace algo interesante: toma un fragmento de materia orgánica producido por algún otro organismo y se lo incorpora – no del todo, porque parte pasa a su través sin cambio virtualmente. Pero el material ingerido no es utilizado como tal: se descompone, reordena químicamente y forma moléculas que necesita el animal y que entonces éste aprovecha.

≪ El comer es algo tan corriente, que solemos olvidar cuán extraordinario es este proceso. Comemos lechugas y no nos *convertimos* en lechugas; se transforman dentro de *nosotros*. Según una magnífica frase de Feynman "los cerebros de hoy son el puré de patatas de ayer".

≪ ¿Cómo llega a desarrollarse sin esfuerzo tal capacidad para la transmutación molecular? Y si un animal es adulto ¿por qué tiene que alimentarse? Si ya ha alcanzado su masa óptima ¿por qué ha de pasar por la búsqueda del alimento, su proceso y aprovechamiento? Parece ser que hay dos razones generales. La primera, que el animal come para adquirir energía y así llevar a cabo otros procesos biológicos, como por ejemplo, moverse, respirar o volver a comer. Y la segunda, que come porque tiene unos materiales que reparar. Los enlaces químicos que mantienen unidas las moléculas que componen el animal, tienden a romperse. Si no se impidiera, las moléculas se disociarían, se desintegrarían los sistemas celulares y el organismo moriría. Los períodos de vida relativamente cortos que la mayoría de los animales pueden resistir sin comer, atestiguan la inestabilidad esencial de los seres

vivos superiores. Algunos organismos, cuando se tropiezan con escasez de comida u otros inconvenientes del medio ambiente, no pueden más que recluirse y esperar a que mejoren las condiciones, pero la mayoría de los organismos superiores precisan de una alimentación segura continua.

≼ De las otras actividades evidentes de los animales, muchas son accesorias a la alimentación o no esenciales. La respiración es un sistema para extraer del alimento la máxima cantidad de energía; la movilidad propende a asegurar la adquisición del alimento; la excreción es un medio para desprenderse de la comida no metabolizada; la irritabilidad –respuesta del organismo a los estímulos exteriores– y la capacidad para aprender, aumentan las posibilidades de que el animal no acabe sus días en las fauces de algún otro animal. También están las propiedades de algunas máquinas calculadoras electrónicas a las que nadie está dispuesto a llamar "vivas".

≼ La característica restante, que parece esencial para los sistemas biológicos y que comparten todos los animales, es la reproducción. Es cierto que en una definición estricta del sistema viviente como aquél autoreproductor se deberían excluir los mulos pero a pesar de las apariencias externas, incluso éstos se reproducen a un ritmo colosal o al menos las células que los constituyen.

≼ Si observamos los hábitos reproductores de los animales, serán varios los factores que nos chocarán. La reproducción de un animal completo ocurre con relativa rareza. Los animales están movidos a reproducirse por una fuerza excepcional, aun cuando de ello no les resulte un beneficio material evidente. Los organismos tienden a reproducirse en su propia clase, por lo cual, la reproducción sucede dentro de una especie. La reproducción está lejos de ser idéntica, sobre todo en los animales superiores, en los que la fertilización va acompañada de una redistribución aleatoria de los factores génicos parentales, que son los que determinan las características del nuevo animal. Hay, generalmente, una edad a partir de la cual la mayoría de los animales carecen de capacidad para la reproducción. Finalmente, observamos que la mayoría de los animales mueren de muerte natural poco después de haber alcanzado esa edad.

≼ ¿Puede ser que en cierto sentido la reproducción sea el "punto" de actividad biológica? ¿Podemos imaginarnos un organismo que realice el metabolismo y todas las demás funciones atribuidas ordinariamente en los libros de texto de biología elemental a los sistemas biológicos; que disponga de mecanismos restauradores eficaces por los que soporta las vicisitudes y que nunca se reproduzca?.

Nos lo podemos imaginar, pero no lo encontraremos nunca. ¿Por qué, no? Pues porque no hay modo de que surja un organismo así. El único mecanismo que conocemos para la reproducción de complejidad biológica es la evolución por selección natural, la supervivencia preferente de los organismos que, por suerte, están mejor adaptados a las condiciones de su medio ambiente. Pero la selección natural sólo puede ocurrir si los organismos bien



Figura 14-1 Fotomicrografía electrónica parcial de una célula de alga, planta simple. La amplificación es de 25000 aumentos. (Cortesía del Dr. G. E. Palade, del Laboratorio de Citología del Instituto Rockefeller para la Investigación Médica, Nueva York.)

adaptados se reproducen. Así pues, el desarrollo de complejidad de los sistemas biológicos está íntimamente relacionado con sus autorreplicaciones.

⋞ La historia paleontológica muestra claramente el desarrollo gradual de la complejidad biológica durante la correspondiente historia de la Tierra. Hace mil millones de años, no había aparentemente nada más complejo que los protozoos –organismos unicelulares– y sus colonias. En cambio, hoy, nosotros somos una colección ambulante de alrededor de 10^{14} células coordinadas en origen y función. Cada una de nuestras células muestra grandes rasgos familiares en tamaño, función y composición química con las protozoarias contemporáneas. El principio de la evolución por selección natural nos permite comprender cómo ha tenido lugar este aumento de la complejidad. Y no es que la complejidad de por sí tenga valor de supervivencia, sino más bien que una solución a una crisis ambiental que involucra a muchas moléculas es a menudo cualitativamente superior a otra que implique sólo a unas pocas. Por ejemplo, el ojo que forma las imágenes de los vertebrados es un receptor de luz cualitativamente superior que la mancha ocular de los protozoos. Y éstos no pueden formar ojos porque los ojos constan de más moléculas que las que hay en todo un protozoo. En un medio ambiente en el cual la capacidad para detectar la presencia de predadores que se mueven velozmente o de presas sea un privilegio, sobrevivirán con preferencia los organismos que están provistos de receptores visuales eficaces. La eficacia y la complejidad van emparejadas a este respecto. Esperamos que con el tiempo y por selección natural aparecerán grandes sistemas biológicos y de complejidad extraordinaria que se adaptarán con detalle a sus medios ambientes.

⋞ En la figura 14-1 puede verse la enorme complicación de hasta un simple organismo unicelular. Es la fotografía, tomada con un microscopio electrónico de 25000 aumentos de parte de la célula de un alga. En la periferia puede apreciarse la pared celular que separa al alga del medio ambiente. Hacia el borde superior izquierdo se encuentra el núcleo de la célula, que contiene a la sustancia genética. Entre el núcleo y la pared celular se halla el citoplasma que contiene el elaborado aparato para la fotosíntesis, la respiración y la producción y operación enzimática entre otras muchas funciones. (Las enzimas son proteínas grandes, compuestas de sucesiones de aminoácidos.) La célula no es un saco de enzimas y de otros productos químicos. Tiene una estructura minuciosa y funcional, nada sencilla y sí muy complicada. Tal célula "simple" es, evidentemente, la fuente de donde mana el proceso evolutivo y cuando hablamos del origen de la vida tenemos que hacerlo respecto a una entidad mucho más simple.

⋞ Si seguimos ahora la evolución de la complejidad biológica retrocediendo en el tiempo, podemos imaginarnos entidades mutantes y de autorreplicación incluso más simples que una célula y, con todo, todavía capaces de pasos posteriores por la escalera de la evolución. Dado que el universo está compuesto principalmente de moléculas muy simples no autorreplicativas, quizá podamos llegar a enfrentarnos con el problema del origen del primer sistema autorreplicativo, que es el tema de los próximos capítulos. Sin embargo, por ahora, tratemos de profundizar un poco más en nuestro animal imaginario.

⋞ Se reproduce. ¿Cómo se reproduce? Pensemos en el número enorme de propiedades que tienen los animales corrientes. Hay una anatomía en general, la estructura total del organismo. Luego, hay fisiología, el funcionamiento dinámico y la articulación de las diferentes partes del organismo para realizar sus funciones. Tiene caracteres de comportamiento heredado, tales como la forma de hacer un nido o enterrar un hueso. Tiene como diez billones de células, cada una de ellas con su estructura extraordinariamente compleja. En los momentos actuales, estamos tan sólo dando a tientas los primeros pasos hacia la composición de una célula partiendo de retazos. Sin embargo, la información para formar un organismo entero es algo que está contenido en el material genético, porque, con sorprendente regularidad, los animales se parecen a sus padres.

⋞ El problema de la herencia, en realidad no es uno, sino dos problemas: ¿Cómo se transmite de generación en generación la información génica? y ¿cómo se convierte en acción esta información en el desarrollo de un organismo nuevo? Estas dos preguntas pueden hacerse de otra forma: ¿Qué es el código génico? y ¿cómo "lee" el código el organismo en desarrollo?

⋞ Los aspectos más significativos de la vida no suelen ser los más evidentes. La molécula orgánica más abundante en la Tierra es la celulosa; sin embargo, no estamos formados por celulosa y tenemos gran dificultad para metabolizarla. Es comprensible que pensemos se ha sobrestimado su importancia. Un árbol, en cambio, si pudiera hablar, no compartiría esta opinión. El tipo con mayor número de especies identificadas es el de los artrópodos y, en tal sentido, la vida en la Tierra es mayormente de escarabajos. A pesar de ello, con justificado enojo podríamos pensar que una comisión de inspección biológica procedente de algún otro planeta que pasara su estancia en la Tierra estudiando los escarabajos habría menospreciado algunos otros animales de importancia. Igualmente nos podemos engañar cuando examinamos la composición química de una célula clásica –sea, una bacteria –cuyo censo en función del número de moléculas de sus constituyentes podría ser el siguiente: lípidos, 30 millones; fosfolípidos 20 millones; proteinas, 5 millones; polisacáridos, 1 millón; ácido ribonucleico (RNA), 40 mil; ácido desoxirribonucleico (DNA), 1 molécula. Si los bioquímicos concentraran toda su atención en los lípidos, también habrían menospreciado las demás partidas.

⋞ Experimentando con guisantes y con fanerógamas, el sacerdote -botánico Gregor Mendel, dedujo en 1865 ciertas reglas empíricas sobre la transmisión de los caracteres hereditarios que en su honor se conocen como leyes de Mendel. Hacia la misma época, aproximadamente, se aislaron los ácidos nucleicos y descubrieron los cromosomas. Y con todo, no fue hasta la década de 1950 que se demostró la relación entre las leyes empíricas de Mendel, el comportamiento microscópico de los cromosomas y la química de

los ácidos nucleicos. En realidad, algunos aspectos de esta relación –especialmente entre los cromosomas y los ácidos nucleicos– están aún por dilucidar.

≮ Los cromosomas son corpúsculos filiformes que están en el interior del núcleo de la célula, que sufren un intrincado ritual de duplicación y segregación durante la reproducción de una célula. En el primer decenio de este siglo se puso en evidencia que la coreografía cromosómica era exactamente el proceso que necesitaba la genética mendeliana para explicar la transmisión de los caracteres hereditarios. Así, la base original para la creencia de que los cromosomas son el material genético, fue su comportamiento durante la reproducción y nada tuvo que ver con su composición química. El hecho de que los cromosomas estén compuestos en grado significativo por ácidos nucleicos ha sustentado, a su vez, la opinión de que éstos intervienen en la herencia. Hoy en día se dispone de demostraciones de esta tesis que son mucho más poderosas, entre las que se encuentran la de que la inyección de DNA de un virus a una célula bacteriana, puede modificar por completo su función, convirtiendo una fábrica de bacterias en una fábrica de virus.

≮ El material genético de todos los organismos conocidos en la Tierra está compuesto principalmente de DNA y RNA. Estos ácidos nucleicos han codificado dentro de su estructura la información que se puede reproducir por transmisión de generación en generación. Además, tienen capacidad de autorreplicación y mutación. El DNA hace de heliografía molecular que regula el metabolismo, produce una replicación de si mismo para que siga en la próxima generación y, a través de los siglos, cambia gradualmente, o se transforma, dando lugar a nuevas formas de vida.

≮ La estructura y función del DNA se han descubierto, principalmente, por el biólogo molecular americano James J. Watson, de la Universidad de Harvard y el biólogo molecular británico Francis H. C. Crick, (2) de la Universidad de Cambridge. El DNA es una molécula larga, que comprende dos cadenas moleculares arrolladas entre sí en forma helicoidal o de madeja. En la figura 14-2 se muestra una pequeña sección de una molécula de DNA y, en la figura 14-3, como modelo molecular. Durante la división celular, las cadenas se separan y cada una sintetiza un duplicado de la otra, dando dos moléculas de DNA donde orginalmente sólo había una. Este es el acontecimiento de reproducción molecular primario. Los bloques constituyentes de esta síntesis se denominan nucleosidofosfatos (3). Gran parte de la actividad de la célula esá dedicada a la construcción de esos bloques constituyentes, a partir de moléculas mucho más sencillas que toma del alimento ingerido que

2.- N. del T. Watson y Crick recibieron conjuntamente el premio Nobel de medicina y fisiología de 1961 por el descubrimiento de la estructura del DNA.

3.- N. del T. Nucleosidofosfato, nombre abreviado de éster fosfórico de nucleósido.

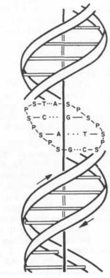


Figura 14-2. Esquema de un segmento corto de molécula de DNA. Las dos cadenas complementarias están compuestas alternativamente de azúcares y fosfatos. Las cadenas se unen por la base, en la combinación adenina-timina o guanina-citosina. El eje vertical de la figura no es más que para orientación y no corresponde a ninguna propiedad de la molécula de DNA.

las reúne para formar ácidos nucleicos. Cada uno de los nucleosidofosfatos está compuesto de azúcar, una base y algunos fosfatos. Una molécula dada de ácido nucleico está compuesta generalmente de cuatro clases de nucleosidofosfatos. Su secuencia a lo largo de la cadena es una clase de código de cuatro letras que determina qué sucesiones de aminoácidos y, por tanto, qué proteinas, formarán la célula.

≮ En la figura 14-2 puede verse como las dos cadenas helicoidales verticales tienen sentidos de giro opuestos. Como muestra la intercalación, las cadenas están conectadas por pares de bases elegidas entre cuatro: adenina (A), citosina (C), guanina (G) y timina (T). Las propias cadenas están compuestas de azúcares (S) y fosfatos (P). Así, un nucleósido, es la

combinación de una base y un azúcar, como AS, mientras que ASP es ejemplo de un nucleosidofosfato. (Un nucleosidofosfato que sólo tenga un éster fosfórico se llama nucleótido). La secuencia de bases -por ejemplo, las bases TCAG a lo largo de las vueltas de la cadena de giro a la izquierda- especifica el código genético para determinar qué proteínas formará la célula, Estas, a su vez, son cadenas largas de aminoácidos. Hay pruebas recientes que evidencian la necesidad de los tres nucleosidofosfatos en el ácido nucleico para especificar cada aminoácido de la proteína. La secuencia de la transcripción es ésta: el DNA sintetiza RNA; varias clases de RNA, juntos, forman proteínas, en particular, enzimas; éstas, regulando las velocidades y variedades de las reacciones químicas en la célula, rigen el metabolismo. De esta forma, los ácidos nucleicos regulan activamente la forma y funciones de todas las células.

≼ La replicación exacta -la producción de dos moléculas idénticas de DNA a partir de una- tiene lugar porque sólo algunas combinaciones de bases son las que pueden encajar entre las dos cadenas. Durante la replicación del DNA se separan las dos cadenas helicoidales. Las bases expuestas al medio celular determinan que nucleosidofosfatos del medio se pueden combinar con las cadenas separadas. Por ejemplo, supongamos que un nucleosidofosfato que contiene adenina está ligado a una cadena. En el medio se dispone de otros nucleosidofosfatos y quizá, casualmente, se acerquen lo suficiente para que se produzca el enlace químico. Si se adiciona un nucleosidofosfato que contenga guanina, no procederá la síntesis de DNA, porque la combinación guanina-adenina será demasiado grande para el espacio disponible entre las cadenas. Una combinación de adenina-citosina no se combinará apropiadamente, ni tampoco una de adenina-adenina. Unicamente la de adenina-timina se acomoda entre las cadenas. Por otra parte, la combinación de timina-citosina es demasiado pequeña para la doble hélice de DNA y no alcanza a las cadenas. La replicación del DNA ocurre en gran parte porque la timina (T) se enlaza solamente con la adenina (A) y la guanina (G) sólo con la citosina (C). Así pues, una vez especificada la secuencia de bases a lo largo de una de las cadenas, queda determinada a lo largo de la otra. (Véase la figura 14-2.) Por ejemplo, si una sección de una cadena de la molécula de DNA tuviera la secuencia de base TCAGAGTGACCGATATTC, deduciríamos inmediatamente que la sucesión de bases en la otra cadena sería AGTCTCACTGGCTATAAG.

≼ La replicación de los ácidos nucleicos suele ser idéntica, pero no siempre. Por influencia de factores externos, como la radiación, o por puros movimientos moleculares aleatorios, pueden tener lugar cambios en la estructura de los ácidos nucleicos. Por ejemplo, en una cadena puede suprimirse una base o substituirse por otra, o puede invertirse la sucesión de bases en una secuencia lineal corta. Puesto que así se cambia la sucesión de las bases, serán diferentes las proteínas que ahora formará esta molécula de ácido nucleico. Por lo general, la secuencia de bases cambiada dará una parte

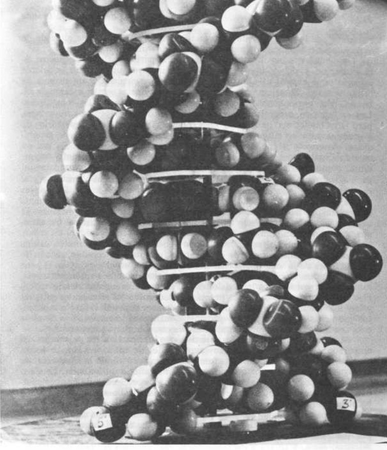


Figura 14-3. Modelo de un segmento corto de molécula de DNA en la que los átomos están representados por esferas y secciones de esfera. Las distintas variedades de átomos están representadas por colores diferentes. En la figura 14-2, las letras como S o A indican moléculas que contienen una docena o más de átomos; en esta figura están representados directamente. Las moléculas reales de DNA pueden ser miles de veces más largas que los cortos segmentos mostrados en las figuras 14-2 y 14-3. Es evidente la complejidad de las moléculas de ácido nucléico. (Cortesía del Profesor Paul Doty, del Departamento de Ciencias Biológicas de la Universidad de Havard.)

"absurda" de la proteina que haya codificado, es decir, la parte alterada de la proteina no desempeñará ninguna función de utilidad.

⩽ Quizá puedan ilustrarse mediante una parábola algunos aspectos de la evolución y del código genético. Erase una vez un antiguo y estable imperio cuya capital se unía a las provincias principales por un sistema de caminos reales. El gobierno cotidiano de las provincias estaba a cargo de sátrapas, que normalmente los nombraba el emperador en las localidades. Los sátrapas se superaban en el cumplimiento de las órdenes imperiales, pero sus iniciativas personales eran pocas. Tenían cierto repertorio de respuestas para las situaciones críticas, respuestas que venían ya de generaciones anteriores y que por lo general daban buen resultado. De vez en cuando llegaba un mensaje del emperador respecto a algún asunto importante, como los impuestos al campo para el año siguiente o la preparación de los trabajadores industriales. Esos mensajes se cumplían al instante y al pie de la letra, pues su sabiduría era legendaria. Pero en aquel tiempo, los mensajes imperiales venían redactados indefectiblemente en una lengua extranjera. El habla de la capital no era el dialecto de las provincias. El cuidado y competencia de la traducción correspondía por tanto a los sátrapas, que mantenían para este fin a un grupo de visires bilingües.

⩽ El emperador, miembro de una venerable e ilustre familia, estaba enclaustrado permanentemente en la capital, remota e inaccesible, aislado de las tensiones de la vida provincial. Era conservador, en el mejor y en el peor de los sentidos. Creía firmemente que, con ligeros cambios sin importancia, los métodos y mandatos imperiales de sus antecesores seguían siendo aplicables en su época. Por tanto, su práctica era consultar las efemérides antiguas y leer los venerables mandatos de sus ascendientes imperiales. En los momentos propicios despachaba a las provincias mandatos idénticos. Los tiempos eran tranquilos y las amenazas externas escasas; el imperio prosperaba.

⩽ Con todo, había cierta ansiedad que compartían los palaciegos del emperador. Se refería a un gran secreto que, de tanto en cuanto había afectado en épocas pasadas a las familias imperiales –desde la fundación de la augusta familia– y era que al emperador le afligía un balbucir. Es claro que no siempre; por lo general estaba lúcido y se cercioraba de que sus mandamientos se cumplían en las provincias. Pero en raras ocasiones le acudía el balbuceo y no había quien pudiera entenderle. El emperador decía ¡"Blu, blu"! Y los cortesanos repetían "blu, blu" e inclinaban sus sabias cabezas. El correo imperial, mensaje en mano, se montaba en su corcel y cabalgaba por los caminos imperiales hacia las provincias. ¡"Blu, blu"!, decía a los sátrapas; éstos, a su vez a los traductores, que pasaban el "blu, blu" al dialecto provincial. "Blu, blu" decía el sátrapa a los trabajadores y a los soldados y cumplía con su deber. Pero éstos no sabían qué quería decir "blu, blu" y seguían esperando un mandamiento imperial que se entendiera. Y pronto se ponía en camino un mensaje lúcido con otro correo. Todo se ponía en orden y lo único que se perdía era un poco de tiempo.

⩽ Pero los malos momentos –los cortesanos lo sabían– eran cuando el balbucir del emperador *parecía* lúcido. ¡Oh! decía a veces "doblado ser debe impuesto patata el" y los trabajadores tenían que reconstruir su significado o quedarse parados. Sin embargo, hacía otras cosas. Podía introducir un "no" en un decreto, donde nadie lo esperaba, o substituir un nombre por otro, lo que invariablemente llevaba a un desastre. Pero no había palaciego ni correo ni sátrapa que pusiera en tela de juicio las disposiciones imperiales. La palabra de un autócrata absoluto es ley, como afirma el caso del Teniente Kijé, que es el tema de una obra de Prokofiev. Así, en ocasiones, había serios problemas en las provincias.

⩽ Sucedió un día, que una desesperada crisis de origen externo surgió en las provincias. Su motivo no nos importa ahora: el emperador no se enteró nunca. Era muy diligente en dar órdenes para las provincias, pero muy renuente a recibir noticias de las mismas. La crisis fue más allá de las posibilidades de los sátrapas; no estaba incluida en el repertorio de respuestas que tenían. En aquel momento, por fortuna –pues el emperador nada sabía de la crisis– se despachó a las provincias un balbuceo imperial. Era de los aparentemente lúcidos y dirigido a las actividades de los trabajadores. Por fortuna, milagrosamente, el mal entendido balbuceo resolvió la crisis. De todas las incoherencias posibles –y eran muchas– el emperador, por casualidad, había dicho la correcta en el momento oportuno. El emperador se salvó.

⩽ Esta no es forma de llevar un imperio, diremos. Y sin embargo, en cierto sentido, es como funcionan los sistemas biológicos. Muy crudamente –pues la analogía no es exacta– la capital es el núcleo y las provincias el citoplasma de la célula. El enclaustrado emperador con sus efemérides es el DNA nuclear; el correo y su mensaje, el RNA cifrado en el núcleo y traducido en el citoplasma. Los sátrapas y los visires son los ribosomas y el RNA adaptador, que hace de armazón molecular, que organiza los aminoácidos citoplásmicos en la secuencia especificada por el RNA mensajero. La traducción es necesaria porque el RNA mensajero lleva en la secuencia de bases de sus nucleótidos la información de la secuencia de aminoácidos de las proteinas a formar. Los trabajadores y soldados son las enzimas. La realimentación de citoplasma a núcleo es aparentemente insignificante. La disrupción accidental de la secuencia de base de DNA produce casi invariablemente un efecto deletéreo en el funcionamiento de las proteinas formadas. Pero muy rara vez la mutación produce un efecto saludable. La evolución biológica está basada en la emergencia fortuita de tales mutaciones beneficiosas casuales. Es evidente que por cada organismo que mejor se adapte a causa de una mutación beneficiosa, hay millones que perecen a consecuencia de una perniciosa. La selección natural tiene lugar solamente porque (1) interviene un número enorme de organismos y (2) porque las que se reproducen con preferencia son las mutaciones beneficiosas. Sin embargo, la evolución por "balbuceos" hereditarios es un proceso lento.

⩽ Experimentando con crías, principalmente de la mosca del vinagre, la

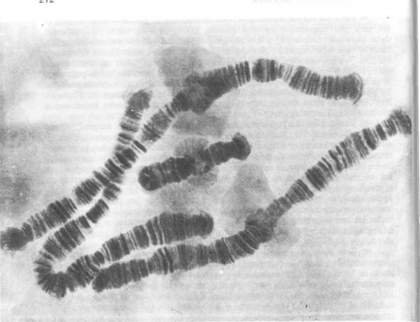


Figura 14-4. Fotografía de unos 700 aumentos de los cuatro cromosomas en la glándula salival del enanillo *Chironoumus*. La secuencia de bandas corresponde mucho a la secuencia de los genes del material genético del organismo. Las regiones agrandadas pueden ser lugares de producción activa del RNA mensajero. (Cortesía del Profesor W. Beermann, del Instituto Biológico Max Planck, de Tubinga.)

Drosophila melanogaster, Thomas Hunt Morgan (4) junto con sus alumnos de la Universidad de Columbia, halló en la década de 1920, que los caracteres hereditarios o genes, estaban dispuestos en orden lineal en los cromosomas, controlando cada gen uno o más rasgos del organismo. Todos los organismos corrientes tienen más de un cromosoma y en la reproducción sexual los

4.- N. del T. Premio Nobel de Medicina de 1933

cromosomas de los progenitores están reordenados al azar, dando con ello a la descendencia la ocasión de una constitución física no experimentada previamente. Es tan grande el número de posibles reordenaciones, que explica de por sí de modo natural el hecho de que, excepto el caso de gemelos idénticos, no haya dos individuos iguales.

⩽ La *D. melanogaster* y otros insectos, por suerte para nosotros, tienen un juego de cromosomas gigantes en sus glándulas salivales. Esos cromosomas (figura 14-4) son a bandas por naturaleza y dichas bandas están en la correlación de 1 a 1 con los genes deducidos de los estudios con crías. Puesto que todas las células de la mosca salen del mismo huevo fecundado, es de esperar que los cromosomas de las glándulas salivales sean estructralmente idénticos a los de las células reproductoras. Si falta un gen, falta una banda; cuando aparece duplicado, observamos una banda doble, etc. Esto ha sido la gran confirmación del hecho observado de que los genes están extendidos en orden lineal a lo largo del cromosoma y que cada uno de ellos regula al menos uno de los caracteres hereditarios.

⩽ Algunos cromosomas de las glándulas salivales presentan un agrandamiento ocasional, una región bulbosa. (Véase la figura 14-4.) Se cree hoy día que esas ampollas son los lugares de los genes activos, en los cuales el material genético codifica una secuencia particular de nucleosidofosfatos en el RNA mensajero. Se ha averiguado que las ampollas llevan consigo altas concentraciones de RNA. Es pues posible que el RNA mensajero se separe por sí solo del DNA de la ampolla del cromosoma y migre al citoplasma de la célula donde dirige la síntesis proteínica. Aunque estas conclusiones se hayan deducido de tan sólo una variedad pequeña de organismos, existe toda la razón para creer que tiene lugar el mismo proceso para todos los organismos de la Tierra.

⩽ Aunque existe una vaga correlación entre el número de cromosomas y nuestra suposición de la complejidad evolutiva del organismo (por ejemplo, la *Drosophila* tiene cuatro pares de cromosomas: los seres humanos, 23), esta correlación está lejos de ser una regla general. Las plantas particulares que contienen el mayor número de cromosomas por organismo no son, ni con mucho, la especie dominante del planeta. No es el número de cromosomas lo que cuenta ni tampoco la cantidad de material genético, sino más bien su contenido informativo.

⩽ Un cromosoma de *Drosophila melanogaster* típico puede tener una longitud aproximada de 1 micrómetro (10^{-4} cm). De los experimentos con cultivos de *Drosophila* se ha podido determinar, sin siquiera ver su composición química, que un cromosoma dado de *D. melanogaster* contiene, al menos, 1000 genes. Si dividimos un micrómetro en mil partes iguales, veremos que cada gen es de unos 10 Å (1 Å = 10^{-8} cm). Puesto que puede haber muchos genes que controlan caracteres que a los geneticistas no les resulta fácil discernir, podemos suponer que el tamaño de un gen es un poco menos que 10 Å.

⩽ El tamaño del gen deducido así a partir de los estudios de cultivos,

está confirmado por la estructura del DNA, en la que hallamos que la distancia entre nucleosidofosfatos contiguos a lo largo de la misma cadena polinucleótida es de 3,4 Å. La substitución de unos de estos nucleosidofosfatos cambia el significado del código triplete del cual forma parte y por ello alterará un aminoácido en la proteína que este ácido nucleico codifica. Por ejemplo, se sabe que algunas enfermedades hereditarias de los seres humanos provienen de una de esas substituciones de un aminoácido. Por tanto, la menor unidad genética significativa del material hereditario tiene unos 3,4 Å de longitud.

≪ ¿Es realmente posible que la sucesión de nucleosidofosfatos, a lo largo de la cadena de DNA pueda contener la información necesaria para formar todo un organismo? ¿Un ser humano? La masa de DNA en un conjunto de cromosomas humano es de unos 4×10^{-12} gramos. Un par de nucleosidofosfatos (en cadenas opuestas de la doble hélice) tiene una masa del orden de 10^{-21} gramos. Por lo tanto, parece ser que hay unos 4×10^9 pares de nucleosidofosfatos por juego de cromosomas, según este cálculo del geneticista americano H. J. Müller (5), de la Universidad de Indiana.

≪ En cada una de las 4×10^9 posiciones disponibles para un nucleosidofosfato, sólo son posibles cuatro combinaciones del mismo. En una cadena dada, la base puede ser T, C, A o G y, en la cadena complementaria, A, G, T o C, respectivamente. El número de posibilidades para una "abertura" a lo largo de una molécula de DNA, es cuatro. El número de combinaciones posibles para dos aberturas consecutivas es de $4 \times 4 = 16$; para tres, $4^3 = 64$, etc. Así pues, para 4×10^9 existen $4^{4 \times 10^9}$, o bien $10^{2.4 \times 10^9}$ variedades posibles de cromosomas humanos. Esto es, evidentemente, un número enorme, mucho mayor que el número de partículas elementales del universo apreciable que, como vimos en el capítulo 11, es aproximadamente 10^{80}. También es mucho mayor que un googol, pero mucho menor que un googolplejo.

≪ Este número es una medida de nuestra improbabilidad. Si pudiéramos lanzar al aire 4×10^9 pares de nucleosidofosfatos y que cayeran de dos en dos en cualquier orden, sólo existiría una probabilidad entre $10^{2.4 \times 10^9}$ de reordenar uno de nuestros cromosomas. Si realizáramos este ejercicio imaginario de reordenación aleatoria de moléculas de DNA al ritmo de una vez por segundo, durante la vida de la Galaxia, no llegaríamos, ni con mucho, a formar ni un cromosoma de cualquiera de nosotros.

≪ Pero si nuestro DNA es *eso* tan improbable ¿Cómo puede haber llegado a formarse del todo? Nuestra improbabilidad está extraída del medio ambiente por selección natural. Nuestros ácidos nucleicos *no* están formados al azar. La vasta mayoría de combinaciones de base no se han ensayado nunca. Cada combinación se forma sobre otras ya existentes. Las secuencias de nucleosidofosfatos efectivos se realizan de generación en generación,

5.- N. del T. Hermann Joseph Müller, premio Nobel de Medicina de 1946

intactas, durante millones de años. De hecho, la similitud de las secuencias de base entre los DNA de dos organismos diferentes se puede aprovechar ahora como índice del parentesco evolutivo. De esta forma se ha podido demostrar a aquéllos que lo ponían en duda, que el hombre y el mono tienen más afinidad entre sí que el hombre y el ratón.

≪ La información contenida en una simple célula espermática humana es equivalente a la de 133 volúmenes, cada uno del tamaño y calidad de papel del *diccionario completo Webster*. Al menos, ahora podemos comprender cómo esta información pudo llegar a un ser por selección natural. Sabemos cómo la selección natural puede sacar orden del caos, si hay sistemas autorreplicativos y mutantes en un medio ambiente no estático. Pero de nuevo nos enfrentamos con la cuestión del origen del primer sistema como tal.

≪ El origen de la vida en la Tierra parece estar íntimamente unido al origen prebiológico de las proteínas y de los ácidos nucleicos. No sabemos que las proteínas y los ácidos nucleicos tengan que estar íntimamente involucrados en los sistemas biológicos de otros planetas, aunque hay algunas pruebas en favor de ello, que se presentarán en el capítulo 18. Pero si tenemos que idear equipos para detectar vida extraterrestre que no sea desesperadamente como la local, en aspecto, hemos de tener algún conocimiento general de los sistemas biológicos. ≫ Es posible que encontremos en otros planetas fenómenos que, aun poseyendo todos los atributos esenciales de la vida en la Tierra –quizá incluso el racional– existan en diferentes formas y función de acuerdo con principios diferentes.

Convendría tener una definición puramente funcional de la vida que no estuviera confinada a la química terrestre conocida. ≪ Concluímos el capítulo volviendo a esta cuestión. ≫

En términos de cibernética, el matemático soviético A. A. Liapunov ha formulado sobre el tema algunas ideas preliminares interesantes. La cibernética ≪, palabra acuñada por el matemático americano Norbert Weiner (6), ≫ se refiere al estudio de los procesos de gobierno y a la construcción de sistemas de control. ≪ La cibernética se desarrolló al mismo tiempo que se construían las primeras computadoras electrónicas grandes. ≫ Liapunov cree que el gobierno, en su más amplio sentido, es la propiedad más universal de la vida, independientemente de la forma.

6.- N. del T. Aun cuando se respeta la traducción, creemos conveniente añadir que esta afirmación no es del todo cierta o que no es completa. La palabra es, de por sí de origen griego, *Kybernetike* = arte de gobernar (de la cual ya se ocuparon los griegos) y de *cibernética* habla Platón en algunos de sus *Diálogos*. También Ampère el siglo pasado habló de cibernética en su clasificación de las ciencias. Lo que sí es cierto, es que la obra de Norbert Weiner titulada *Cybernetics*, publicada en 1947, fue la que impulsó al estudio del análisis lógico de las funciones de los seres superiores y de los posibles procesos para su reproducción artificial.

≪ Debido a la necesidad de evolucionar por selección natural para desarrollar sistemas vivos de cualquier complejidad, una posible definición útil de vida es ésta: sistema biológico es cualquiera que sea capaz de autorreproducirse y mutarse, que reproduce sus mutaciones y que ejerce cierta influencia en el medio ambiente. Esta definición es bastante más rígida que la de Liapunov. ≫

Otra definición de la vida por la que aboga el bioquímico soviético A. I. Oparin, del Instituto A. N. Bach, es en función de un sistema complejo metabólico altamente regulado para el intercambio de materia con el medio. El metabolismo, claro está, es un atributo esencial de la vida. Pero, en el contexto de los orígenes ¿Es el metabolismo el que lleva a la vida o la vida al metabolismo? Hasta la fecha no ha habido una respuesta del todo satisfactoria. Convendría tener presente que en los sistemas no vivientes, como por ejemplo en las disoluciones líquidas, se pueden ver formas simples de intercambio de materia (pero que no están altamente reguladas y que por tanto no constituyen procesos metabólicos).

Según el punto de vista de Liapunov, los sistemas biológicos tienen los siguientes caracteres especiales: la transmisión por conductos definidamente prescritos de cantidades pequeñas de energía o material conteniendo un gran volumen de información, es responsable del control subsiguiente de vastas cantidades de energía y materiales. (Un ejemplo claro es el control por el material genético en el hombre, de la forma, desarrollo y procesos químicos de los individuos más desarrollados.) Liapunov hace ver que la herencia, la irritabilidad, etc, se pueden describir en términos cibernéticos como almacenamiento de información, realimentación, sistema de canales de comunicación, etc.

Todos los materiales biológicos dependen de su masa, composición química, estado energético, propiedades eléctricas y magnéticas, etc. En términos generales, estas propiedades cambian al cabo del tiempo, aunque una pequeña fracción de los materiales sigue invariable. Esas sustancias conservan su estabilidad a pesar de los cambios que suceden en el medio externo. Liapunov llama a esas reacciones, en las que la substancia sobrevive a los cambios del medio externo, *reacciones de mantenimiento*; en ellas entran todos los procesos biológicos. Efectivamente, la vida se caracteriza por su adaptación al medio externo.

En lenguaje cibernético pueden describirse del siguiente modo las reacciones que se mantienen: el material que percibe, recibe información del medio ambiente externo en forma de señales codificadas. Esta información es reprocesada y enviada en forma de nuevas señales a través de canales o redes determinados. Esta información nueva efectúa una reorganización interna del sistema que contribuye a la conservación de su integridad. Al mecanismo que reprocesa la información se le denomina sistema de control; consta de un vasto número de elementos de entrada y de salida, comunicados por los canales a través de los cuales se transmiten las señales. La información puede guardarse en un sistema de memoria o recordación, que puede constar de elementos aparte, cada uno de los cuales puede estar en uno de los varios estados estables. El estado particular del elemento varía por influencia de las señales de entrada. Cuando varios de tales elementos están en ciertos estados especificados, la información, en efecto, se registra en forma de texto de longitud finita empleando un alfabeto con un número finito de caracteres. ≪ Estos procesos son la base fundamental de las calculadoras electrónicas actuales y, en varios aspectos, muy análogos a los sistemas de memoria biológicos. ≫

El sistema de control dirige las reacciones de mantenimiento del organismo o máquina calculadora y su respuesta al medio externo. La respuesta tiene lugar por recolección de información respecto a los estímulos externos, analizándola en sus partes componentes y comparándola con la información que ya está registrada en la memoria. Cuanto mayor sea la cantidad de información almacenada previamente, más adaptable será el sistema de control. Una propiedad importante de la reacción de mantenimiento es su velocidad de respuesta, pues si estas son lentas, se ve comprometida la supervivencia del sistema. Así pues, para el banco de memoria se requiere una gran capacidad de almacenamiento de información que, a su vez debe estar guardada de manera exacta y estable.

Liapunov opina que las distintas moléculas, compuestas por números de átomos suficientemente grandes, es posible que actúen como portadoras estables de información material. Dichas moléculas son sistemas cuánticos. A fin de lograr otro estado de información, deben ser elevadas a otro nivel de energía, suficientemente distante del original para que tengan lugar pocas transiciones debidas al movimiento térmico aleatorio.

No debe disminuir el suministro de energía para las reacciones de mantenimiento y, sin embargo, tales sistemas pierden constantemente calor y energía a causa de su actividad. De acuerdo con los principios de la termodinámica, los niveles de energía en un sistema cerrado –el que está completamente aislado de su entorno– han de llegar con el tiempo a lograr el equilibrio. Si un sistema biológico fuera cerrado, cualquier pérdida de energía pondría en peligro su estabilidad. Por tanto, no se mantendrá un estado estable a menos que reciba energía del medio externo, con lo cual el sistema biológico se convierte en sistema abierto.

Una propiedad termodinámica importante de cualquier sistema así es su entropía. La entropía puede definirse como magnitud de la energía inaprovechable de un sistema termodinámico ≪ o bien, como magnitud del desorden de un sistema. En uno cerrado, no puede tener lugar ningún proceso en el cual decaiga la entropía, es decir, que el desorden en cualquier sistema cerrado aumentará a medida que pase el tiempo; al cabo de una cantidad infinita de tiempo, el desorden tendrá que ser completo y los átomos tendrán que estar distribuidos aleatoriamente (en ausencia de otras influencias). Si se representa un sistema biológico como un sistema cerrado, su entropía irá aumentando continuamente. El desorden que rebrota, llegará con el tiempo a la detención de todos los procesos biológicos; en consecuencia, un organis-

mo vivo tiene que perder sistemáticamente entropía para mantener el orden interno, lo cual sólo es posible a expensas del medio externo. El organismo ha de tener energía del medio externo y cederle entropía, de modo que la suya propia pueda disminuir continuamente y hacer que se conserve su integridad estructural y funcional. Como ya dijimos antes, esta es una razón por la cual las células tienen metabolismo. ⋗

Las antiguas definiciones de la vida, que la identificaban con el metabolismo, resultaron inadecuadas; en nuestra opinión, carecían por completo de valor. Liapunov caracteriza a la vida como a un sistema material altamente estable que usa información codificada por estados moleculares para la producción de reacciones de mantenimiento.

La organización real de los sistemas biológicos en orgánulos subcelulares, células, órganos, organismos, poblaciones, especies, etc, es análoga a la jerarquía de los sistemas de control. Cada unidad estructural está gobernada por su propio sistema de control semiautónomo, que actúa sobre todas aquellas unidades subordinadas al mismo y que, a su vez, es influido por aquellos sistemas de control que le son superiores en orden jerárquico.

Existe una distribución entre los sistemas de control dentro de un organismo aislado y los que influyen sobre un conjunto de organismos (como poblaciones, especies, etc.). En el primer caso el sistema de control consta de unidades que actúan directamente hacia abajo en la escala jerárquica. Liapunov llama a esto método estructural de control. En el segundo caso, tenemos un número grande de sistemas iguales estadísticamente, más o menos independientes, que interactúan por encuentros casuales. Liapunov llama a esto método estadístico de control. Aquellos sistemas de mayor rango —por ejemplo, la especie— son significativamente más estables que cualquier constituyente particular dado (en este caso un organismo aislado). Pero esta mayor estabilidad del sistema superior sólo es posible si las partes constituyentes son reemplazables, es decir, si tiene lugar la reproducción.

Para que una parte constituyente recién sintetizada participe en su medida a la estabilidad, ha de contener una provisión preformada de información, almacenada en su banco de memoria, que garantice sus reacciones de mantenimiento y es del todo inconcebible que esa provisión de información pueda surgir de modo espontáneo dentro del propio constituyente. Por tanto, un constituyente nuevo tiene que obtener de otros constituyentes ese almacenamiento de memoria necesario para sus funciones; lo más razonable es que sea a partir de otros constituyentes semejantes a los que podríamos considerar como de la generación precedente. De este modo, se ve la reproducción en gran medida como replicación de información.

La transmisión de información de generación en generación tiene lugar en un fondo de interferencia que, parcialmente, puede alterar su carácter. ⋖ Si tal alteración del depósito de la información hereditaria se replica idénticamente, es decir, si se transmite a las sucesivas generaciones la información alterada, dicha alteración puede llamarse "mutación". ⋗ Esas mutaciones cambian los sistemas de control modificando las reacciones de

mantenimiento y, con ellas, el carácter de la interacción del sistema con su entorno; pueden alterar radicalmente la eficacia con que un ente dado hace frente a su medio ambiente.

⋖ Por tanto, es posible describir los sistemas biológicos desde un punto de vista cibernético. Por ahora, no es, quizá, más que una analogía conveniente; ha proporcionado una idea, pero hasta ahora ninguna información nueva. ⋗ Es posible que en el futuro la síntesis de este enfoque cibernético con la biología molecular lleve a la comprensión total de la naturaleza de la vida, comprensión que todavía no tenemos, como reconoce el propio Liapunov. Estas ideas y los puntos de vista afines del físico soviético Kolmogorov (que se exponen en el capítulo 35) puedan al fin demostrar ser de gran importancia para el análisis del problema del origen de la vida en la Tierra y la probable distribución difundida de la vida por el universo.

15

El origen de la vida: puntos de vista históricos y panspermia

Mas ahora, para llevar más adelante la investigación, veamos por qué peldaños hemos de subir para la adquisición de cierto conocimiento de los secretos más profundos concernientes al estado y accesorios de estas nuevas tierras. Y primero, ¿qué probabilidad hay de que puedan estar provistas de plantas y animales al igual que nosotros? Supongo que nadie negará que hay algo más de ingenio, algo más maravilloso en la producción y crecimiento de las plantas y animales, que en los montones sin vida de cuerpos inanimados, aunque nunca sean tan grandes como las montañas, los arrecifes y los mares. La mano de Dios y la Sabiduría de la Divina Providencia se manifiesta en ellos mucho más claramente que en los inanimados. Uno de los seguidores de Demócrito o de Descartes quizá se aventurara a dar alguna explicación tolerable de los aspectos del Cielo y de la Tierra, y hasta de los átomos y del movimiento, pero al llegar a las plantas y a los animales se verá incapaz y no nos dará razón de su producción. Pues cada una de las cosas en ellos está tan exactamente adaptada a algún Designio, todas sus partes tan acopladas para su uso propio, que manifiestan una Sabiduría Infinita y un Conocimiento exquisito de las Leyes de la Naturaleza y de la Geometría, que el omitir esas maravillas de la generación lleva incluso al absurdo de pensar que se forman por feliz confusión en el movimiento casual de no sé qué pequeñas partículas

Christiaan Huygens, *Nuevas conjeturas respecto a los mundos planetarios, sus habitantes y producciones* (1670)

¿Se puede dudar que en el queso y la madera se engendran gusanos, o escarabajos y avispas en las boñigas o que las mariposas, las cigarras, los crustáceos, los caracoles, las anguilas y otras vidas se procrean en materia putrefacta, que sirve para recibir la forma de la criatura para la cual está dispuesta por una fuerza formadora? Poner esto en duda, es ir contra la razón, el entendimiento y la experiencia. Quien lo pone en duda, que vaya a Egipto y allí verá los

campos cuajados de ratones engendrados en el fango del Nilo para gran calamidad de sus habitantes.

Opinión del siglo XVII citada por L. L. Woodruff en *The Evolution of Earth and Man* (1929)

Nada parece ahora más contrario a la razón, que esa coyuntura y porquería diera a un ser uniformidad, regularidad y belleza . . . . y creara animales vivos . . . Sin embargo, esa era la opinión no sólo del ignorante y del analfabeto, sino también de los filósofos serios más eruditos de las épocas precedentes y probablemente se seguiría pensando y creyendo así todavía si los microscopios no hubieran descubierto el modo cómo se generan todas esas cosas. . . .

Henry Baker, *The Microscope Made Easy* (1742)

≪ En una época anterior y más sencilla, se creyó que la vida surgía espontáneamente de la nada. Esto era una observación corriente. No, quizá, precisamente de la nada, sino los ratones del fango del Nilo, los gusanos de la carne podrida, los piojos del sudor y las luciérnagas de los incendios, tal como parecían indicar las más elementales observaciones. La cuestión del origen de la vida era trivial, la vida surgía a cada instante, al menos, en los animales inferiores.

≪ Puesto que los animales superiores surgían de la reproducción de los de su propia clase, la cuestión de *su* primer origen era más difícil. El punto de vista dominante, hallado en el Génesis 1-20-27, en la *Teogonía* de Hesiodo (s. VIII a. J.C.) y en el mito sumerio de la creación, se invoca a la creación por separado de cada especie por mandato divino. Pronto surgieron las oposiciones a estas creencias, pues si los organismos inferiores surgen espontáneamente ¿por qué los primeros superiores autorreproductores no podían haberse desarrollado de algún modo a partir de predecesores más sencillos? El filósofo presocrático Anaximando (1) afirmaba que la vida surgió en el mar y que el hombre procede de algún pez. Empédocles (490 a. J.C.) expresó una idea semejante a la de la selección natural de Darwin. ¿Es posible que los organismos superiores, tan maravillosamente adaptados a sus medios ambientes, surgieran por algún proceso natural a partir de organismos más sencillos?

Aristóteles (384-322 a. J.C.), en el libro II de su *Física* reafirma la opinión de Empédocles en las siguientes frases clásicas.

> ¡Por doquier, entonces, todas las partes llegaron a ser justo lo que habrían sido si se hubieran reunido para un fin; tales cosas sobrevivieron, estando organizadas espontáneamente de forma conveniente; mientras que las que crecieron de otro modo perecieron y continuaron para perecer. . .

Este pasaje lo cita Darwin en la primera página de *El origen de las especies*, sin estar, al parecer, al corriente de que luego Aristóteles iba a criticar la hipótesis de Empédocles:

> Y con todo, es imposible que este punto de vista sea cierto, pues . . . todas. . . las cosas naturales, invariable o normalmente, acaecen de algún modo y ninguno de los resultados casuales o espontáneos es verdad. . .

1.- N. del T. Filósofo de la escuela jonia (610 - 547 a. J.C.) discípulo de Tales de Mileto. Descubrió la oblicuidad de la eclíptica y el giro de los cielos alrededor de la estrella polar.

¿Qué es lo que preocupa a Aristóteles? Parece que dice que un cambio fortuito, pero conveniente, de las características de un organismo no se puede mantener, porque no hay forma para que éstas resulten establecidas entre muchos organismos. Los hijos de los mancos nacen normalmente, como los demás, con dos brazos. Se descuida la posibilidad de que las variaciones aleatorias del material genético puedan reproducirse y resulten de ello características adaptables estables para toda una población.

⋞ Después de la época de Lucrecio, que hizo eco de las hipótesis de Empédocles, la autoridad mixta de Aristóteles y de la Iglesia medieval era tan grande que se aceptó como dogma de fe el origen espontáneo de los animales inferiores. Pero cuando el renacimiento italiano floreció por toda Europa, se corroyó la confianza en la antigüedad venerable y en las explicaciones tradicionales: "Todo aquél que en las discusiones se apoya en su autoridad, no hace uso de su inteligencia sino de su memoria. . . , " dijo Leonardo da Vinci. La comprobación experimental de la hipótesis se aceptó ampliamente. Así en 1665, el físico italiano Francesco Redi, sometió a una prueba experimental la hipótesis de la generación espontánea. Observó que cuando se cubre con una tupida gasa la carne en putrefacción, nunca se desarrollan gusanos. Descubrió que los gusanos eran formas larvales de moscas que ponían sus huevos en la carne. Cuando se cubría la carne con la gasa, las moscas no podían depositar los huevos y no se producían gusanos.

⋞ Unos diez años más tarde que Redi contradijera la generación espontánea a nivel de la mosca doméstica, un holandés, Antony van Leeuwenhoek, descubría los microorganismos, por lo cual, sin yerro por su parte, prolongó el debate sobre la generación espontánea durante otros dos siglos. Leeuwenhoek averiguó que en el agua aparentemente pura y especialmente en la que contenía impurezas orgánicas tales como infusiones de heno, abundaban los microorganismos. He aquí su fascinante explicación de los descubrimientos.

> El 24 de abril de 1676, observando por casualidad esta agua, vi en ella con gran sorpresa inexplicablemente muchos animálculos, de varias clases; entre otros, algunos que eran tres o cuatro veces más largos que anchos. Su espesor total era, a mi juicio, no mucho mayor que uno de los pequeños pelos que cubren el cuerpo de un piojo. Estas criaturas tenían unas patas muy finas y cortas delante de la cabeza (aunque no puedo reconocer ninguna cabeza, hablo de ella por la razón de que esta parte era la que siempre iba hacia adelante durante el movimiento) . . Cerca de la parte posterior hay un claro glóbulo y supuse que esa parte estaba hendida. Estos animálculos son muy listos mientras se mueven; frecuentemente se trastornan todos.

⋞ ¿De donde venían esos "animálculos"? El propio Leeuwenhoek creía que en todas partes había diminutas semillas o gérmenes de los animálculos y que, cuando tenían acceso a medios nutrientes, como las infusiones de heno, entonces se desarrollaban. Puesto que los gérmenes pueden surgir de los mismos microorganismos no hay necesidad de invocar a la generación espontánea. A pesar de ello, muchos hombres instruidos no aceptaban el origen extraño de los microorganismos, especialmente cuando una variedad de experimentos parecía demostrar que las disoluciones orgánicas, cubiertas o descubiertas, hervidas o sin hervir, desarrollaban siempre "animálculos". No fue hasta1861, dos años después de la publicación de *El origen de las especies*, de Darwin, que se puso fin a este problema. Louis Pasteur en su *Memoria sobre los cuerpos organizados que existen en la atmósfera*, demostró con todo rigor que el aire efectivamente contiene "gérmenes" tal como supuso Leeuwenhoek; que la introducción de estos gérmenes en un medio estéril, indefectiblemente lleva a la aparición de microorganismos y que los medios orgánicos estériles expuestos al aire, pero no a los gérmenes, no desarrollan nunca cultivos microbianos.

⋞ (Es curioso el hecho de que poco después de haber utilizado las técnicas de la esterilidad para resolver un problema del origen de la vida, las aplicó Pasteur a una cuestión experimental sobre la vida extraterrestre. En 1864 cayó cerca de Orgueil, Francia, un gran meteorito de un tipo conocido ahora como condrito carbonoso y Pasteur hizo que se le practicara un barreno especial con la esperanza de extraer de su interior muestras sin que se contaminaran al sacarlas. Empleando técnicas estériles, Pasteur inoculó un medio orgánico para averiguar si se desarrollaban algunos microorganismos indígenas que el meteorito pudiera contener en su interior. Los resultados fueron negativos y aún hoy tienen importancia. Pasteur extrajo la muestra poco después de la caída del meteorito y llevó a cabo, naturalmente, el experimento con mucho cuidado. En el capítulo 23 volveremos a estudios más recientes sobre formas posibles de vida en el meteorito de Orgueil y otros.)

⋞ Así pues, hacia 1860 no fue posible ya seguir manteniendo que los organismos contemporáneos, no importa cuán sencillos sean, salgan espontáneamente de precursores no vivos. Hacia la misma época Darwin había postulado un sistema razonable por el cual se explicaba por selección natural el desarrollo de los organismos complejos a partir de los más simples. Sin embargo, subsistió el problema del origen del primer organismo. Nadie como el propio Darwin apreció con más profundidad la dificultad de este problema. "No es más que una tontería pensar en el presente sobre el origen de la vida", decía Darwin en 1863 en una carta a Hooker. "Igual podría pensarse del origen de la materia". En esto tenía razón Darwin. Como ya vimos en los capítulos 7 y 8, *estamos* ahora pensando, con cierto éxito, en el origen de la materia y se están llevando a cabo rigurosos estudios científicos sobre el origen de la materia y de la vida. Pero a finales del siglo pasado no había medios para experimentar el origen de un organismo vivo partiendo de materia inanimada. El problema parecía de dificultad imposible.

⋞ En ese clima intelectual, el químico sueco Svante Arrhenius (2) pro-

2.- N. del T. Físico y químico, (1859 - 1927) premio Nobel de química de 1903. El año 1900 siendo director del Instituto Nobel expuso una teoría sobre la cola de los cometas y

puso en 1907 la hipótesis de la panspermia. Decía que la vida terrestre no se había originado en la Tierra. Imaginaba que podían haber viajado de mundo a mundo a través del espacio interestelar formas elementales de vida propulsadas por la presión de radiación. Esa procedencia extraterrestre de la vida pospuso al menos las dificultades inherentes a su origen, a pesar de que los estudios de nucleogénesis estelar ignoran el problema del origen del hidrógeno. Quizá no haya problema sobre el principio de la materia; el universo puede ser infinitamente viejo y puede haber habido siempre materia en él. Por la misma razón, aun cuando la panspermia no sea un método muy efectivo para poblar un planeta, los descendientes de un organismo, transcurrido el tiempo necesario, podrían llegar a poblar un universo estático. ≫

Consideremos la docilidad filosófica de la hipótesis de la panspermia. ¿Qué objeción, en principio, podría ponerse a las esporas que hacen ese magno recorrido cósmico de planeta a planeta y de un sistema estelar a otro y que luego, por casualidad, caen en un planeta en el cual las condiciones les son propicias para revivir e iniciar la vida? La idea no es contraria a la filosofía materialista. ¿Es verdaderamente *necesario* suponer que la vida en la Tierra tuvo que salir de ella misma partiendo de materia inanimada? Y partiendo del supuesto de que hay multiplicidad de mundos habitados ¿no es del todo lógico investigar la posibilidad de que haya intercambio de organismos entre los planetas? Sólo mediante un sistema de correlación temática, de astronomía, biología y ciencias afines se puede llegar a confirmar o a rechazar para siempre la hipótesis de la panspermia.

Sagar, no hace mucho, intentó analizar este problema con profundidad. ≪ Arrhenius suponía que los microorganismos terrestres que flotan en el aire, a veces eran arrastrados a la estratosfera por los vientos de la atmósfera. Por los estudios efectuados con globos sonda se tienen pruebas evidentes de la existencia de microorganismos a grandes alturas, bien adentro de la estratosfera. Arrhenius postulaba que, en ocasiones, esos organismos eran expulsados completamente de la Tierra por fuerzas eléctricas. Tal idea es válida en principio, pero en la práctica no sabemos con qué eficacia son lanzados los microorganismos; si es que efectivamente eso sucede. Esta es una de las motivaciones para obtener los perfiles microbiológicos a grandes alturas de la atmósfera y exosfera terrestre.

≪ Supongamos, lo mismo que Arrhenius, que efectivamente tiene lugar de vez en cuando esa proyección electrostática de microorganismos desde las capas altas de la atmósfera terrestre. ¿Qué destino les espera? Por conveniencias de notación, llamemos "chinche" a uno de esos microorganismos, en el bien entendido de que tiene que ser mucho más pequeño que cualquiera de los insectos comunes así llamados. El hado de una chinche lanzada depende

dio la hipótesis de la panspermia. En 1907 presentó su obra *El devenir del mundo*. Y con todo, su fama se debe principalmente a su teoría de la ionización de los electrolitos y de ella la de los iones.

de la relación p/g en la que p es la magnitud de la fuerza producida por la presión de radiación, que tiende a separarlo del Sol, y g la fuerza de gravedad debida al Sol, que tiende a atraerlo. En ausencia de cualquier otra fuerza, si $p/g = 1$, la chinche se queda simplemente en el espacio interplanetario; si p/g es menor que 1, cae en el Sol y si p/g es mayor que 1, en tal caso abandona el sistema solar. Como p y g son inversamente proporcionales al cuadrado de la distancia, r, que media entre la chinche y el Sol, resulta que p/g es independiente de r. En cambio, el valor de la fuerza *neta*, p/g varía inversamente al cuadrado de r.

≪ Para cierta especie de chinche, algo así como los microorganismos terrestres, el intervalo de valores de p/g mayor que 1 dentro del cual puede escapar, es muy pequeño. Ha de ser de un radio aproximado entre 0,7 y 0,6 μ suponiéndola esférica; ha de ser comparable a la longitud de onda de la luz visible [1 micrómetro (μ) = 10^4 Å = 10^{-4} cm]. En consecuencia, cualquier chinche que sembrara la Tierra —para iniciar la vida en tiempos remotos, por ejemplo— tendría que haber sido de un tamaño fuera de ese margen. La dimensión característica de un microorganismo terrestre ordinario es de varias decenas de micrómetros, si bien hay bacterias y esporas (3) de hongos y muchos virus cuyas dimensiones estan entre los 0,2 y 0,6 μ.

≪ Dado que la fuerza de la presión de radiación continúa ejerciéndose sobre un organismo cuando éste se aleja del Sol, su velocidad continúa aumentando y pronto alcanza velocidades muy elevadas. Así pues, una chinche de tamaño dentro de ese margen que partiera de las proximidades de la Tierra, pronto, en cuestión de semanas, entraría en la órbita de Marte; en meses, en la de Júpiter; en años en la de Neptuno y recorrería una distancia como a la estrella más próxima, en unos pocos miles de años. Si en su peregrinar por el espacio no sufriera ninguna colisión, atravesaría la Galaxia al cabo de unos centenares de millones de años. Sin embargo, Shklovskii ha advertido que a lo largo de esas distancias, casi seguro que la chinche no se trasladaría en línea recta, ≫ sino que tendería a hacerlo del mismo modo que una partícula de polvo interestelar, (a la que se parece en tamaño, masa y composición) es decir, de forma irregular y aleatoria. Después de haber recorrido la distancia de algunos decenios de años luz, podría cambiar repentinamente la dirección a causa de una colisión, o incluso fusionarse con otra partícula de polvo interestelar. Así pues, la chinche tendría tendencia a dar un "paseo" por la Galaxia sin orden ni concierto; algo así como el movimiento browniano de las partículas pequeñas en una disolución.

≪ A causa de la ruta errática resultante, que cruza y repite lo andado, el tiempo de tránsito de una chinche entre dos lugares de la Galaxia es, en

3.- N. del T. Las esporas pertenecen al reino vegetal; son órganos reproductores de tamaño pequeño, muy resistentes al calor, al frío y a muchos medios hostiles; resisten incluso la desecación durante años; se reproducen cuando encuentran un medio que reúna las condiciones favorables. Y cuando germinan, dan un organismo que no siempre es igual al progenitor.

consecuencia, mucho más largo que si la recorriera en línea recta y sin choques. ≫ Para cubrir una distancia de unos 1000 años luz (aproximadamente 1/30 de nuestra distancia al centro galáctico), necesitaría varios cientos de millones de años y para cruzar toda la Galaxia, 10^{11} años, que es un intervalo de tiempo mayor que la edad que se le calcula. ≪ Así pues, si la Tierra hubiera sido sembrada hace miles de millones de años –como haría falta para ir de acuerdo con la escala de tiempos evolutivos– la primera chinche tuvo que ser lanzada desde una estrella que no estuviera a más de 6000 años luz, *suponiendo* que los desvíos de las partículas de polvo interestelar fueran como hoy los conocemos. Sin embargo, dado que –como hemos visto en el capítulo 5– se producen por colisiones entre ellas mismas y con gas interestelar, es posible que hace miles de millones de años la densidad del polvo interestelar fuera mucho menor que hoy, en cuyo caso la Tierra podría haber sido germinada por una chinche procedente de un sistema planetario que estuviera a más de 6000 años luz.

≪ Pero estas consideraciones de los tiempos de tránsito desprecian una cuestión muy importante ¿Sobrevivirían las chinches a los peligros ambientales del viaje? En primer lugar, la mayor parte del viaje estaría el microorganismo a una temperatura muy baja y a un vacío casi absoluto. Incluso en la época de Arrhenius ya se sabía que había esporas que podían mantenerse largos períodos sumergidas en aire líquido (temperatura de $-196°$ C) sin que ello les afectara a su posterior capacidad reproductora. Y sabemos hoy que algunos microorganismos soportan en laboratorio prolongadas exposiciones a vacíos muy altos. En tales experimentos, ni los vacíos se aproximan a los del espacio interestelar en que la densidad de los átomos es como de 1 átomo por cm^{-3}, ni por razones evidentes el tiempo se acerca a los 10^9 ó 10^{10} años de tránsito de que estamos hablando. Aunque pudiera tener lugar un lento consumo de las moléculas que componen la chinche en el transcurso de esos inmensos viajes, consideremos, para seguir con el razonamiento, que pudieran soportar tolerablemente bien el alto vacío y las bajas temperaturas del espacio interplanetario e interestelar. ≫

Otro riesgo para la panspermia errante es el de las regiones HII de gas interestelar caliente, ionizado, que rodea a las estrellas de los primeros tipos. Esas regiones abarcan cientos de años luz y son sumamente calientes. ≪ Pero hay alguna duda sobre si las densidades de las regiones HII son lo suficientemente grandes para que las temperaturas puedan afectar a las chinches. ≫

¿Qué hay respecto a la radiación? Las chinches están expuestas, entre otras, a la radiación solar ultravioleta y a los rayos cósmicos. ≪ Si le asignamos a la chinche la sensibilidad a la radiación del microorganismo más resistente que se conozca, la radiación ultravioleta solar a longitudes de onda cortas de 3000 Å mataría a la panspermia en potencia en el momento de su partida, dentro del mismo día de su lanzamiento desde la Tierra al espacio interplanetario. En el caso máximo improbable de que el microorganismo proyectado tenga una tolerancia infinita a la radiación ultravioleta, serían entonces los rayos X y los protones de origen solar los que lo matarían antes de llegar a la órbita de Neptuno.

≪ Insistimos en que, al menos para el lanzamiento desde el sistema solar, no pueden evitarse los peligros de la radiación proveyendo a la chinche de una capa protectora. Con una que fuera del espesor necesario para que la chinche resistiera la radiación, resultaría demasiado grande para proyectarla por presión de radiación solar. De modo análogo, tampoco podemos defender la hipótesis de la panspermia imaginando esporas intersticiales enclaustradas en las fisuras de partículas de polvo interplanetario o de meteoros y apantalladas de ese modo de la radiación perniciosa.

≪ Los mismos argumentos son válidos para una menor que 0,2 μ sin protección, que penetrara en nuestro sistema solar en lugar de salir de él: acumularía una dosis letal de radiación mientras entrara. Pero las chinches proyectadas desde planetas a grandes distancias de una estrella –por ejemplo, desde la posición de Urano o de Neptuno de nuestro sistema solar– correrían unos riesgos de radiación despreciables. Por lo tanto, la posibilidad de proyección desde esos mundos o de llegada a los mismos, no se puede descartar fundándose en la sensibilidad a la radiación.

≪ Si la panspermia tarda demasiado, pueden morir por otra clase de radiación. En el capítulo 7 vimos que el flujo de rayos cósmicos principales en la vecindad de la Tierra era de unos 0,04 roentgens (R) al año; en el espacio interestelar es esencialmente el mismo. Los microorganismos conocidos más resistentes a la radiación no se destruyen hasta que acumulan dosis de 10^6 a 10^7 R. Sobre esta base resultaría que en $4 \times 10^6/(4 \times 10^{-2}) = 4 \times 10^8$ años, la panspermia rezagada moriría por los rayos cósmicos. En realidad, el problema es algo más complicado. Cuando un rayo cósmico primario (generalmente un protón de energía alta) entra en un microorganismo, produce en parte su efecto dañino por ionización de la estructura interna del organismo. Sin embargo, otra parte del daño causado, es por los rayos cósmicos secundarios –partículas menos energéticas que se crean en la desaceleración del primario. Para un microorganismo sencillo que flote en el espacio, la mayoría de los rayos cósmicos secundarios emergerían del organismo sin producirle daño e irían al espacio circundante. A causa de sus diminutas dimensiones, los microorganismos serían en consecuencia más resistentes a los rayos cósmicos que los organismos mayores cuyos tejidos absorberían las radiaciones secundarias. Si los rayos cósmicos han sido siempre tan intensos como lo son hoy en la vecindad de nuestra superficie, pueden restringir el viaje interestelar por la panspermia a distancias superiores a unos cuantos miles de años luz, aunque la limitación exacta depende mucho de la contribución desconocida de los secundarios.

≪ Volvamos ahora a otras estrellas distintas del Sol. En general, cuanto más caliente es una estrella, mayor es el valor de p/g, aunque también menor su vida en la serie principal –período durante el cual cabe razonablemente esperar que se desarrollen los planetas de la estrella–. Supongamos que el

planeta dador (el planeta que arroja la panspermia) estaba poblado desde por lo menos unos cuantos cientos de millones de años, bien por el origen indígena de vida en ese planeta (en cuyo caso la estimación es muy generosa), o por proliferación de una espora que llegó antes procedente de otro mundo dador. Encontramos entonces que solamente pueden arrojar panspermia las estrellas de la serie principal de los tipos espectrales entre AO y GS. La mayor parte de las estrellas de la Galaxia son más frías que el Sol; sólo un pequeño porcentaje queda comprendido entre los tipos espectrales anteriores; por lo tanto, serán también sólo unas pocas estrellas las que puedan tener planetas dadores para la hipótesis de la panspermia. Para estos tipos espectrales, las estrellas más calientes pueden arrojar microorganismos con un mayor margen de tamaños, pero al mismo tiempo presentan un riesgo a la radiación mucho mayor. Las estrellas mucho más frías que el Sol no pueden, en absoluto, arrojar panspermia. Podemos concluir que los únicos posibles dadores son los planetas exteriores de las estrellas en el intervalo de tipos espectrales entre AO y GS, las cuales pueden arrojar microorganismos de tamaños comprendidos entre 0,1 μ y 3,0 μ.

≪ Los planetas aceptores han de ser claramente diferentes a los dadores. De nuestro sistema solar se proyectan chinches de tamaño entre 0,7 y 0,6 μ ; en consecuencia, las de este tamaño no pueden entrar nunca en él. Cuanto más caliente es la estrella, mayor es el margen de tamaños de las chinches que se apartan del sistema solar de la misma desviadas por la presión de radiación. Por tanto, los planetas aceptores más probables son aquellos en órbita alrededor de las enanas M frías y los exteriores de las estrellas G y K. Los lugares más propicios del sistema solar para buscar panspermia interestelar son, pues, las lunas de los planetas exteriores, sobre todo Tritón, el satélite interior de Neptuno. La panspermia de mayor tamaño –sea, por ejemplo, en el intervalo de 1,0 μ– se podría encontrar en alguna otra parte si sobreviviera a la radiación del viaje. El geneticista americano Joshua Lederberg (4) de la Universidad de Stanford, propuso que la Luna, que no es probable que tenga formas de vida indígenas, podría ser un lugar apropiado para buscar panspermia interestelar.

≪ Otro punto de controversia para la hipótesis de la panspermia al que todavía no hemos aludido, es la geometría. Los espacios entre las estrellas son inmensos. Una chinche "andando" a la ventura en su camino hacia la Galaxia tiene en realidad muy pocas probabilidades de tropezarse accidentalmente con un posible planeta aceptor. Para que la Tierra pudiera haber recibido en sus primeros mil millones de años de historia un microorganismo procedente de una fuente estelar, cada uno de los 10^{11} planetas que se supone hay en la Galaxia, tendría que haber lanzado al espacio como una tonelada de microorganismos durante ese tiempo. ≫ Naturalmente que podrían modificarse estos valores. Por ejemplo, si sólo hay 10^{8} planetas poblados,

4.- N. del T. Pionero de la biología espacial. Premio Nobel de medicina y biología de 1958.

entonces cada uno de ellos tendría que lanzar una tonelada de esporas cada millon de años. ≪ Puesto que no sabemos la proporción real de microorganismos lanzados desde los planetas, en especial por medios electrónicos, no podemos afirmar la posibilidad de estos valores, si bien es cierto que parecen bastante altos. Los estudios de la población microorgánica de la atmósfera superior de la Tierra sería muy conveniente para estas consideraciones, aunque no es favorable el pronóstico para la hipótesis de la panspermia.

≪ Aunque sólo sea de pasada, citaremos otra clase de germinación planetaria. Hasta ahora hemos hablado de presión de radiación como medio concebible para el transporte interestelar de entes vivos. Thomas Gold, de la Universidad de Cornell, ha hecho ver otra posibilidad. Supongamos, de momento, que la Galaxia está poblada acá y acullá por civilizaciones técnicas avanzadas. Puesto que esas civilizaciones probablemente están mucho más avanzadas que la nuestra, pueden haber descubierto y practicado los vuelos por el espacio interestelar. (Véanse los capítulos 32 y 33.) Supongamos, dice Gold, que una expedición de una de esas civilizaciones –un viaje de reconocimiento, por ejemplo– aterriza en un planeta misericordioso, pero que nunca había estado habitado. A menos que se tomen las precauciones más rigurosas, de seguro que contaminarán el planeta, pues la nave, su aire y ellos mismos estarán poblados por muchos microorganismos.

En realidad, la prevención de contaminación accidental de Marte por la primera nave espacial no tripulada destinada a aterrizar allí es un problema muy serio. (Véase el capítulo 19.) Sin embargo, Gold imagina esa contaminación planetaria de un modo más vivo. Se imagina a los visitantes haciendo una jira por el planeta virgen y dejando tras ellos los restos de la comida. De este modo, algún residente microbiano de una miga alimenticia primordial puede ser el antecesor de todos nosotros.

≪ Aunque es comprensible que este origen de la vida a partir de unos desperdicios no sea muy atractiva, no debemos excluirla del todo. Quizá una raza de extraterrestres avanzados fuera lo escrupulosamente cuidadosa para no contaminar un planeta no poblado anteriormente, pero quizá no lo fuera. Existe también la posibilidad adicional de que dicha civilización iniciara intencionadamente la vida de planetas no habitados por una cualquiera entre varias razones: preparar el planeta para la ulterior colonización con, evidentemente, una escala de tiempo muy largo en la mente; para distribuir el material génico de su propio planeta, a fin de que en caso de catástrofe no se perdiera irreversiblemente el patrimonio evolutivo; quizá simplemente como experimento biológico de laboratorio a escala mucho mayor que la acostumbrada. Si en el universo hay vida racional, no se pueden excluir estas posibilidades aunque no se pueda decir mucho más acerca de ella. Si dejamos a un lado estos últimos resortes –en las mejores circunstancias contemporizarán con los hechos reales– no tendremos más remedio que afrontar el problema del origen de vida indígena. Este es el tema de nuestros dos próximos capítulos. ≫

16

Acondicionamiento físico para el origen de la vida

Mirando atrás la prodigiosa vista del pasado, no hallo indicios del comienzo de la vida y, por lo tanto, me eximo totalmente de formar un juicio concluyente respecto a las condiciones de su aparición. El creer, en el sentido científico de la palabra, es un asunto grave y necesita unas bases sólidas. Decir, pues, admitiendo la falta de pruebas, que tengo cierta creencia respecto al modo en que se originan las formas de vida existentes, sería usando palabras en sentido erróneo. Pero se crea o no, es admisible la suposición y si me fuera dado *mirar más allá* de los abismos del tiempo registrado geológicamente a los aún más remotos períodos en que la Tierra pasaba por sus estados físicos y químicos en el que no pudiera verse más que a un hombre que recordara su infancia, podría esperar ser testigo de la evolución del protoplasma biológico a partir de la materia inanimada.

T. H. Huxley (1), *Biogénesis y Abiogénesis* (1870)

1.- N. del T. Thomas Henry Huxley, fisiólogo inglés, amigo de Darwin y copartícipe activo de su teoría de la evolución. Escribió numerosas obras, reunidas en un total de 18 volúmenes.

≼ Imaginemos el sistema solar visto desde fuera: como ha dicho el escritor de ciencia americano Isaac Asimov, cuatro planetas y despojos. Es evidente que los cuatro son Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno. Son objetos grandes, apartados del Sol — objetos fáciles para un telescopio pequeño en algún lugar fuera de nuestro sistema solar. Los espectros de estos cuatro planetas exteriores o joviales muestran hidrógeno, metano y amoníaco en sus atmósferas y se supone la presencia de helio y agua. Estos espectros son muy corrientes en el universo a causa de la abundancia de hidrógeno en él. (Capítulo 4.) Pero a medida que nos aproximamos al Sol se hacen más distinguibles algunos de los despojos; pronto se detectan las claras características superficiales y composición atmosférica de Venus, de la Tierra y de Marte. Por cuanto hasta la fecha sabemos, las atmósferas de Venus, de Marte y quizá también la de Mercurio, están compuestas principalmente por nitrógeno y dióxido de carbono. Pero en la Tierra hay algo extraño: contiene oxígeno en su atmósfera.

≼ Como el óxido y el fuego atestiguan, el oxígeno es un gas reactivo: se combina rápidamente a temperaturas elevadas con otras moléculas (más lentamente a temperaturas bajas) y forma nuevos compuestos químicos. A veces hay que aportar energía para que reaccione el oxígeno; a veces, un catalizador, quizá el agua, acelera la velocidad de reacción. Pero la reacción con el oxígeno es inexorable y, en el mundo inorgánico, irreversible — una calle de dirección única — en tanto dure el oxígeno. *Cuando un material se combina* con el oxígeno se dice que se "oxida". Así, el agua es una forma oxidada del hidrógeno. Las substancias que contienen mucho hidrógeno se dice que están "reducidas". Por lo tanto, también se puede describir el agua como una forma reducida del oxígeno. Las atmósferas de los planetas joviales son reductoras; la atmósfera de la Tierra es oxidante.

≼ La materia orgánica — materia de origen biológico o abiológico que contiene carbono — tiene un contenido elevado de hidrógeno. Y con todo, vivimos en una atmósfera de oxígeno. La oxidación completa de las substancias orgánicas produce dióxido de carbono, agua y nitrógeno. Esta oxidación, que no hace distinciones, es claramente debilitante; destruye el material de que están compuestas las substancias. En consecuencia, los organismos que viven en la Tierra emplean varios mecanismos, algunos muy sofisticados, para evitar el contacto con el oxígeno, a la vez que llevar la oxidación a reacciones moleculares no perjudiciales o a reparar el daño que se haya producido por oxidación. En un sentido muy real, nosotros, organismos terrestres, vivimos en un gas venenoso. Y lo que es más sorprendente todavía, algunos lo respiramos. Nuestros antepasados desarrollaron sistemas para *utilizar* el oxígeno hasta el punto de que nuestra acomodación al veneno nos ha dado incidentalmente

una gran ventaja. La combinación de los productos metabólicos derivados de la descomposición de los alimentos con el oxígeno molecular, permite que nuestra comida se oxide totalmente, a dióxido de carbono y agua.

⩽ Parece ser que se confirió una gran ventaja a los organismos que desarrollaron medios para competir con la presencia de oxígeno molecular libre en la atmósfera. No solamente evitaron la oxidación indiscriminada de su propio material y consiguiente degeneración, sino que desarrollaron la capacidad de oxidación *selectiva* de las substancias alimenticias, lo cual permite extraer de ellas mucha más energía. Por ejemplo, dos organismos, uno anaerobio que no aprovecha el oxígeno molecular y otro aerobio, que sí lo aprovecha, pueden ambos ingerir la misma cantidad de azúcar, y el aerobio extrae de su ración diez veces más energía.

⩽ A causa de la eficacia metabólica de los aerobios, se ha indicado que los organismos en planetas que carecen de oxígeno no pueden estar muy avanzados, aunque no es más que una mera suposición. Quizá dispongan allá de alimentos más energéticos o sus organismos ingieran más deprisa que los nuestros o ser los correspondientes procesos metabólicos más lentos. Es prematuro inferir que todo planeta poblado de organismos superiores ha de tener una atmósfera con oxígeno.

⩽ Si el aprovechamiento del oxígeno proporciona una ventaja metabólica significativa ¿Por qué hay hoy día en la Tierra anaerobios obligados, organismos que se envenenan con el oxígeno molecular? Esos organismos, ninguno de ellos más avanzado que los gusanos, viven en los pocos lugares de la Tierra en los que no hay oxígeno molecular — algunos suelos y el fango oceánico, por ejemplo. Es posible que muchos de ellos sean formas degeneradas que evolucionaron de antecesores que fueron capaces de utilizar el oxígeno. Una especie que viviera muchas generaciones en un ambiente carente de oxígeno, no tendría razón de selección para mejorar ni siquiera para mantener, su aparato de utilización del oxígeno. Una mutación que mutilara este aparato no sería perniciosa en un ambiente de poco oxígeno. Dando tiempo al tiempo es obligado que se produjera esa mutación y que el anaerobio facultativo — el que puede aprovechar el oxígeno o vivir sin él — degeneraría a anaerobio obligado. ¿Pero puede alguno de estos últimos proceder totalmente de antecesores anaerobios? ¿No podrían ser los vestigios de una época anterior en la cual las condiciones anaerobias fueran más corrientes que ahora?

⩽ Resulta interesante que el metabolismo del azúcar en muchos anaerobios sea idéntico en sus primeras fases a como se realiza en los aerobios. (Ambos organismos toman la hexosa — cualquier azúcar con 6 átomos de carbono en su molécula, como la glucosa — y la convierten en hexosa - 6 - fosfato, la cual se tranforma en hexosa-difosfato y ésta, a su vez, se desdobla en dos moléculas de fosfogliceraldehído, etc.). Cada fase está catalizada por un enzima, por lo menos. En el tejido animal, en la levadura y en muchas bacterias, 10 de las 14 primeras fases del metabolismo de las hexosas son idénticas. Esta es otra prueba de las similitudes bioquímicas esenciales de los diversos organismos terrestres y la forma más simple de explicarlas es por suposición de

que todos los organismos que ahora viven en la Tierra tuvieron un antecesor común. Después de estos primeros pasos comunes en la descomposición del azúcar, se separan los caminos metabólicos de varios organismos. Los anaerobios efectúan el proceso de la extracción de energía sólo unos pocos pasos más y se dan por contentos. La energía está guardada en los grupos fosfato de una molécula denominada adenosintrifosfato (ATP), molécula omnipresente en los sistemas vivos terrestres que hace de circulante energético común. Cuando se extrae la energía del alimento, se almacena en los grupos ricos en energía del ATP y cuando se necesita para impulsar alguna reacción se extrae de dichos lugares. (La abreviatura ATP procede de *A*denosin*TriP*hosfhato; por tanto, esta T nada tiene que ver con la T de timina, base nucleósida, que vimos en el capítulo 14 al hablar del DNA.)

⩽ Por otra parte, los organismos aerobios siguen el camino metabólico muchos más pasos, utilizando el oxígeno molecular para extraer del azúcar toda la energía química disponible y almacenarla en el ATP para su uso futuro. ¡Qué curioso es que los pasos metabólicos de los anaerobios sean comunes a los de los aerobios! Hasta llegar a la formación de la molécula de ácido pirúvico son comunes ambos caminos y luego, sorprendentemente distintos. Este hecho sugirió al versátil científico anglo-indio J. S. Haldane, (2) en 1927, que el antecesor común de los organismos terrestres actuales fue un anaerobio y que el metabolismo aerobio es de más reciente creación. Y aún fue más allá: postuló que los organismos primitivos fueron anaerobios porque en aquella época la atmósfera terrestre carecía de oxígeno molecular y en cambio era rica en compuestos reducidos. Haldane supuso que la síntesis prebiológica de moléculas orgánicas ricas en hidrógeno sería mucho más fácil de comprender en un medio ambiente reductor.

⩽ En su tiempo, fue una idea radical. Las opiniones que prevalecían sobre la composición química de la atmósfera terrestre primitiva se inclinaban fuertemente hacia el N_2 y el CO_2, ninguno de los cuales está reducido. El hecho de que el universo está formado casi totalmente por hidrógeno no se supo hasta 1929 y no fue hasta 1934 que se descubriera la presencia de metano y de amoníaco en las atmósferas de los planetas exteriores. Unos años después, se publicó en la Unión Soviética el libro titulado *El origen de la vida*, del bioquímico soviético A. I. Oparin. Atraído fuertemente por las pruebas astronómicas que entonces se tenían, dijo, con total independencia, que la primitiva atmósfera de la Tierra había sido reductora. Más de diez años antes, Oparin había dicho lo mismo en un artículo para un periódico del partido comunista, a partir de la supuesta síntesis abiológica del petróleo, y dicho sea de paso, la cuestión de si el petróleo se produce enteramente de forma biológica, en

2.- N. del T. John Scott Haldane, médico, fisiólogo, biólogo y filósofo (1860-1936). Inventor de la cámara que lleva su nombre para el estudio del metabolismo de los animales. Sus estudios le llevaron a adoptar una posición vitalista.

parte biológica o enteramente no biológicamente, es una cuestión que todavía no está dilucidada.

⩽ La idea promulgada por Haldane y por Oparin de una envuelta de la Tierra primordialmente reductora, es la piedra de toque para los últimos experimentos sobre el origen de la vida, que forman el tema de nuestro próximo capítulo. Hemos visto ya, en el capítulo 4, que por las abundancias cósmicas, una atmósfera planetaria "típica" debería estar compuesta de hidrógeno, helio, metano, amoníaco y agua. Las atmósferas de los planetas joviales — Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno — tienen, así lo creemos, exactamente esa composición. La Tierra y los demás planetas de su tipo — Mercurio, Venus y Marte — debieron empezar sus existencias con atmósferas semejantes; al menos, en el caso de la Tierra, existe una prueba de apoyo independiente. ¿Qué hizo que los planetas terrestres perdieran sus atmósferas primitivas, mientras que los joviales todavía las retienen?.

⩽ La parte más externa de cualquier atmósfera planetaria se denomina exosfera y es de ella de donde se escapan las moléculas al espacio interplanetario. Supongamos que tomamos un objeto, uno cualquiera y de cualquier masa, lo llevamos bien lejos de la Tierra y lo dejamos caer. En ausencia de resistencia del aire, chocará contra la Tierra a cierta velocidad. Invirtamos ahora el proceso: si una masa, como antes, una masa cualquiera, se lanza hacia arriba desde la superficie de la Tierra con aquella misma velocidad, llegará también lejos. Hay una velocidad crítica, llamada velocidad de escape, más allá de la cual la masa que se lance continuará su viaje indefinidamente, es decir, cuando su velocidad sea tan grande que la gravedad terrestre no pueda atraerla hacia sí. Para la Tierra, esa velocidad de escape es de $11{,}2\ km\ s^{-1}$, que corresponde a la que hay que lanzar un vehículo espacial si es que ha de escapar de la Tierra para ir a algún otro lugar.

⩽ Los mismos principios que se aplicaron a las cápsulas Gemini y los Voskhods, se aplican a los átomos y a las moléculas. Si salen hacia arriba, en dirección vertical, a la velocidad necesaria, pueden escapar de la Tierra, a menos que tropiecen en su camino con alguna otra molécula. Una molécula de oxígeno en el aire justo frente a nosotros, que se mueva hacia arriba a una velocidad de $11{,}2\ km\ s^{-1}$, no escapará de la Tierra y, lo más probable es que ni siquiera salga de la habitación; aunque esa molécula con movimiento tan rápido la orientáramos para que saliera al aire libre, tampoco ganaríamos mucho. Tan pronto como arranca para su feliz viaje, choca contra otra molécula — probablemente una estúpida de las que van despacio — y de rebote con algunas otras cercanas y reduce entonces su velocidad molecular a otra más pedestre. Es sólo en la exosfera donde tiene ocasión de escaparse una molécula con movimiento hacia afuera animada de la velocidad de escape; la densidad atmosférica es allí tan baja, que resulta pequeña la probabilidad de choque con otra molécula en su viaje de salida. Pero, puesto que la población molecular de la exosfera es pequeña (por definición, como acabamos de ver), la cantidad de masa que se escapa de la exosfera planetaria tiende a ser relativamente pequeña.

⩽ Las moléculas de poca masa se escapan con mucha más facilidad que las de mucha. ¿Por qué? Porque a una temperatura de exosfera determinada, la tendencia es que todas las moléculas tengan la misma energía. (Esto no es del todo cierto porque las moléculas que se mueven más deprisa ya se han escapado y pronto moléculas de capas inferiores ocuparán sus lugares.) Ahora bien, una molécula masiva que se mueva lentamente puede tener la misma energía que otra más rápida pero con menos masa. Existe una distribución de velocidades moleculares. La mayoría se mueven a cierta velocidad media; unas pocas muy despacio y una minoría muy deprisa. De esta minoría de velocidad muy rápida, algunas, por casualidad, lo hacen verticalmente hacia arriba y son las que se escapan.

⩽ Así pues, en cualquier atmósfera planetaria, el hidrógeno, cuya molécula es la de menos masa, será el que se escapará con preferencia. La pérdida de hidrógeno se suple, hasta cierto punto, por gases que se escapan del interior, sobre todo en los primeros tiempos, y por el viento de protones solar, átomos de hidrógeno ionizado arrojados de la atmósfera solar. En el caso de los planetas terrestres, las temperaturas de la exosfera son bastante altas y la fuerza de la gravedad relativamente pequeña; circunstancias ambas que tienden a realizar la fuga de gases de sus exosferas. La tasa o proporción de escape de hidrógeno es hoy mucho mayor que la de relleno con los gases que se emanan o con el viento solar.

⩽ Por el contrario, los planetas joviales tienen unas fuerzas de gravedad tan grandes y unas temperaturas tan bajas en la exosfera (porque están lejos del Sol) que ni siquiera el hidrógeno, el más ligero de todos los gases, se puede escapar nunca. El tiempo característico necesario para que se escape una fracción significativa del hidrógeno de la exosfera terrestre, es algo así como unos 1000 años. La cifra correspondiente para la exosfera de Júpiter es un googol de años, más o menos. Los gases más pesados, desde luego, se mueven más lentamente y tienen más dificultades para escaparse. De la exosfera terrestre se escapan también cantidades significativas de helio, pero las moléculas tan masivas como el oxígeno atómico son demasiado pesadas y no se escapan. Es posible que Marte, con su menor gravedad, haya dejado escapar grandes cantidades de oxígeno atómico desde la época del sistema solar, hecho que resulta de cierta importancia para la determinación de la posibilidad de que las condiciones en Marte fueran más parecidas a las de la Tierra en los primeros tiempos. En el caso de Mercurio, su poca gravedad y alta temperatura en la exosfera (por su proximidad al Sol) hacen suponer que todas las moléculas menos masivas que el argón (peso atómico 40) se escaparan durante los 5×10^9 últimos años.

⩽ Hacemos resaltar que es la temperatura de la exosfera y no la de la superficie la que determina la tasa de escape. En la Tierra, las temperaturas superficiales son de unos 300 K, que son demasiado bajas para que puedan escaparse cantidades apreciables de hidrógeno. Pero como en la exosfera la temperatura característica es de 1600 K y a veces, en los períodos de activi-

dad solar, pasa de los 2000 K, se escapa allí el hidrógeno. Así pues, vemos que si los planetas interiores y exteriores comenzaron sus carreras con atmósferas fuertemente reductoras, los primeros debieron perder su hidrógeno por escape al espacio interplanetario, mientras que los otros lo retuvieron en perfecto acuerdo con lo que se observa.

≮ Pero este problema tiene su doblez. Como observaron por vez primera D. H. Menzel, de la Universidad de Harvard, y Henry Norris Russell (3), de la Universidad de Princeton, la Tierra es deficiente en gases nobles tales como neón, argón, criptón y xenón. Por espectroscopía astronómica y análisis de meteoritos, que son las únicas muestras de materia extraterrestre de que podemos disponer exceptuando las muestras lunares, sabemos que los gases nobles generalmente son más abundantes —con relación, por ejemplo, al silicio— en casi cualquier otra parte del universo. Así pues, si la Tierra empezó con composición cósmica, algún proceso ha disipado los gases nobles, siendo máxima la disipación para los más ligeros, como el neón y el argón, y menos acusada para los más pesados, que son el criptón y el xenón. Los gases nobles son sobre todo importantes en estudios de evolución de objetos cósmicos, porque con pocas excepciones no forman compuestos químicos; además, permanecen gaseosos hasta temperaturas muy bajas. Puesto que no se combinan ni congelan, tuvieron que eliminarse cuando eran gases. La preferencia por la eliminación de los gases nobles de peso atómico bajo hace suponer el escape desde la exosfera y, en cambio, acabamos de ver que no puede tener lugar el escape de ninguna cantidad significativa de ningún gas que sea más pesado que el helio, dadas la gravedad y temperatura actuales de la exosfera de la Tierra.

≮ Si queremos explicar la carencia de gases nobles por escape molecular, hemos de suponer que la temperatura de la exosfera primitiva era mayor o que entonces era menor que ahora la fuerza de la gravedad. En el capítulo 6 (véase la figura 6-3) tratamos de la evolución primitiva del Sol y vimos que a medida que se ajustaba casi verticalmente, hacia la serie principal, en el diagrama de espectro-luminosidad, su brillo era mucho más intenso que ahora.

≮ ¿Cómo se explica la transición de una atmósfera secundaria reductora a la forma oxidante de la atmósfera actual? Para ello, recurramos a lo expuesto sobre la preferencia de escape molecular de los gases más ligeros; especialmente del hidrógeno. En la atmósfera superior de la Tierra primitiva, las moléculas ricas en hidrógeno —en particular el agua, el metano y el amoníaco— se descomponían por fotólisis con la luz ultravioleta. Lo mismo que un fotón con energía suficiente puede ionizar un átomo, separar un electrón del núcleo, uno menos energético puede romper una molécula en sus partes; el agua, por ejemplo, en sus componentes OH y H. Tras la absorción de otro fotón

3.- N. del T. El de la clasificación de las estrellas según su espectro en supergigantes, gigantes y enanas y cuyo nombre figura compartido en el diagrama de Hertzsprung-Russell.

ultravioleta, el grupo OH puede sufrir la ulterior separación en H y O. Estos átomos de hidrógeno se escapan al espacio, pero los de oxígeno no pueden. El resultado final de la preferencia de escape del hidrógeno es la oxidación de la atmósfera que deja. El metano tiende a convertirse en dióxido de carbono; el amoníaco en nitrógeno molecular. Si el proceso dura lo necesario, aparecerá oxígeno libre. No sabemos si la fotólisis del vapor de agua y el posterior escape del hidrógeno es adecuado para dar cuenta del oxígeno actual en nuestra atmósfera y de la composición química de la corteza terrestre. Algunos cálculos dan que lo es para el contenido de oxígeno y otros, que no. En realidad, hoy, el contenido de oxígeno de la atmósfera se determina por fotosíntesis de las plantas verdes, una especie de fotólisis complicada del agua en la que las plantas hacen uso de fotones visibles en lugar de los ultravioleta que actúan en las capas altas de la atmósfera. Cabe suponer que existía una atmósfera de oxígeno antes que la fotosíntesis de las plantas verdes fuera exuberante en la Tierra, pero también es posible que no se produjera oxígeno libre hasta que aparecieron las plantas.

≮ Resulta pues difícil fijar la época de la transición de la atmósfera secundaria reductora a la actual oxidante de la Tierra. En la figura 6-3 vemos que después de alcanzar la serie principal, el Sol tuvo una luminosidad definitivamente menor, hace miles de millones de años, a la que tiene ahora. En consecuencia, la temperatura de la Tierra tuvo que ser menor. Los restos geológicos muestran señales de que las algas poblaban la Tierra hace unos 2700 millones de años (figura 16-1). Más recientemente, algunos investigadores han encontrado fitol (fragmento que figura en la estructura de la molécula de clorofila) y otras señales de antigua actividad biológica en sedimentos de Minnesota que datan de hace unos 2700 millones de años. Las temperaturas en la superficie de la Tierra en aquel tiempo tenían que estar por encima del punto de congelación del agua. En cambio, entonces, la luminosidad del Sol era tan poca, que la temperatura media de la superficie terrestre tenía que ser unos 20 ó 30° C inferior a la actual, es decir, bien por debajo de 0° C, a menos que algún otro factor o factores no tenidos en cuenta lo impidieran.

≮ Si tuviéramos que calcular hoy la temperatura de la Tierra por su albedo (poder de reflexión de su superficie), la luminosidad del Sol y la distancia a que estamos de éste, encontraríamos unas temperaturas alrededor de 20° C bajo cero. Ese cálculo prescinde del efecto de la atmósfera. Su agua y dióxido de carbono son transparentes en el visible, como todos vemos; sin embargo, en las longitudes de onda del infrarrojo, tienden más bien a ser opacos. Con ello, la luz del Sol atraviesa sin dificultad el vapor de agua y el dióxido de carbono de la atmósfera y calienta el suelo, pero cuando éste trata de radiar otra vez al espacio, en el infrarrojo, ve sus esfuerzos impedidos por la absorción atmosférica, es decir, por el CO_2 y el H_2O. Estas moléculas desempeñan la misma función que el cristal de un invernadero, que también es transparente en el visible y opaco en el infrarrojo. El resultado se conoce como "efecto de invernadero". Las temperaturas en él y en la Tierra son mayores que lo que cabría esperar si la radiación infrarroja emitida no se viera obsta-



Figura 16-1. Piedras calizas algáceas del escudo rhodesiano de Africa. Estas estructuras presentan las propiedades características de las calizas secretadas por las algas calcáreas. Aunque posible, no es probable que estas formas se hayan producido abiológicamente. Si son de orígen biológico, como creen muchos científicos, se cuentan entre las señales más antiguas de vida en la Tierra. Estas piedras calizas se encontraron dentro de rocas que datan de hace unos 2700 millones de años. [Reproducido de un informe de A. M. MacGregor al Trans. Geol. Soc. South Africa 43:9 (1940), con autorización de la Sociedad Geológica de Africa del Sur.]

culizada para escaparse. Parece, pues, razonable atribuir los 20 ó 30° de temperatura adicionales de hace 2700 millones de años a un ligero efecto de invernadero extendido por la atmósfera. ¿Pero qué moléculas tenemos que emplear?

⩽ Con los valores actuales de la aceleración de la gravedad en la Tierra, para que pudieran escaparse los gases nobles haría falta que la temperatura de la exosfera fuera tan elevada como del orden de 100000 K, unas cincuenta veces superior al valor contemporáneo. La misma teoría del escape exosférico demuestra que la escala de tiempo de escape tiene que haber sido muy corta, de unos pocos miles de años. La temperatura de la exosfera se determina por la absorción en la atmósfera superior de los fotones ultravioletas del Sol, por la conversión de la energía del foton en movimiento de las moléculas absorbentes, es decir, en calor. Si bien la temperatura de la exosfera depende, efectivamente, de la especie molecular en concreto de la atmósfera superior, de forma un tanto imprecisa, dicha temperatura es proporcional a la intensidad de la luz solar ultravioleta absorbida. Por tanto, podemos imaginar la eliminación de los gases nobles considerando un período de unos cuantos miles de

años en el que el Sol tuvo una luminosidad unas cincuenta veces superior a la actual.

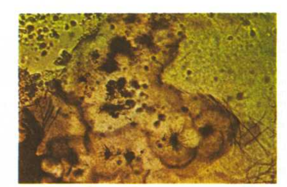
⩽ En la figura 6-3 vemos que esas luminosidades y escalas de tiempo concuerdan con las concepciones actuales de la evolución solar primitiva. Esa coincidencia numérica aproximada da cierto crédito a la hipótesis de que la escasez actual de gases nobles en la Tierra se debe al escape desde una exosfera primitiva caliente. El acuerdo numérico aproximado hace que el argumento sea más persuasivo que si hubiese sido simplemente cualitativo. Sin embargo, antes de poder aceptar esta teoría tienen que analizarse también otros factores tales como, por ejemplo, la fluencia de llegada de material procedente de las capas inferiores de la atmósfera a nivel de escape.

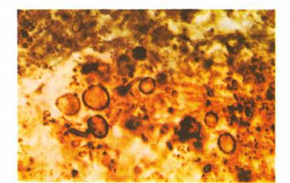
⩽ Como otra posibilidad, supongamos que en la época en que el Sol alcanzó la serie principal, la Tierra estaba todavía en formación. La gravedad en la superficie de un objeto de la masa de la Tierra, pero muy expandida, puede ser mucho menor que su valor actual; en realidad, lo suficientemente menor como para explicar la fuga de los gases nobles sin necesidad de recurrir a unas temperaturas de la exosfera superiores a las actuales.

⩽ Ahora bien, si una fracción grande de la dotación inicial de la Tierra de un gas tan pesado como el xenón o el criptón se escapó al espacio, también tendrían que haberse barrido todos los gases ligeros como metano, amoníaco, agua, hidrógeno y helio; sin embargo, hoy tenemos atmósfera. ¿De dónde vino? El viento solar no resulta del todo adecuado como fuente. Tiene pues que estar formada por los gases que emanaban de su interior — de los volcanes y fumarolas — burbujas de gas sepultadas en el suelo e incapaces ahora de escaparse de la Tierra completada.

⩽ Existe otra prueba geológica, basada en la composición de la corteza terrestre y en la tasa de emanación de gases que se observa hoy día, para sustentar que la atmósfera actual de la Tierra no es la misma que la envolvente gaseosa que la rodeaba durante su formación. Aquella atmósfera se perdió; la actual es de origen secundario. ¿Cuál era la composición química de esa atmósfera secundaria formada después que la Tierra alcanzó su tamaño actual y el Sol la serie principal?

⩽ Las substancias gasificadas que emanan debieron quedar ocluídas en la Tierra durante su formación, con lo cual, su composición tiene que ser la típica de una nebulosa solar cercana a la Tierra. El hidrógeno abundaba; los demás átomos estaban reducidos. Los materiales pudieron quedar atrapados de dos modos: por oclusión y por precipitación. Por oclusión, una burbuja de gas queda materialmente encerrada, por ejemplo, dentro de una roca; por precipitación, se forma un compuesto químico que aflora como líquido o sólido y que no se puede escapar al espacio. Luego, hacia el final del proceso de formación, comenzó a descender la temperatura de la Tierra. El propio proceso de agregación fue fuente de calor. Los cuerpos de todos los tamaños, desde granos de polvo hasta asteroides, fueron posándose, chocando y proporcionando el material para el crecimiento de la Tierra. Las colisiones liberaban calor — posiblemente el suficiente como para fundir la superficie. Otra fuente





Figuras 16-2 y 16-3. Fotomicrografías típicas de sedimentos en horsteno de pedernal del escudo canadiense, ricos en materia orgánica. Los filamentos enmarañados y los objetos más o menos esféricos son ambos microfósiles de origen biológico. Las esferas se conocen como Hurioniospora microrreticulata de Barghoorn, que viene a decir que es una espora hallada en las proximidades del lago Hurón, que tiene una red de finos hilos en su interior y que la descubrió Barghoorn. La pared gruesa y la red de finas líneas sugieren que corresponden a la espora de algún otro organismo. Hurionospora típica de unos pocos micrómetros de diámetro. Los filamentos son multicelulares, otro avance biológico significativo alcanzado en la época en que murieron estos organismos hace unos 2700 millones de años. Sin embargo, comparados con los organismos contemporáneos semejantes, como las algas cianofíceas, estos filamentos muestran mucha *más* irregularidad de célula a célula, circunstancia no siempre regular para un organismo primitivo. (Cortesía del Profesor Elso Barghoorn, de la Universidad de Harvard.)



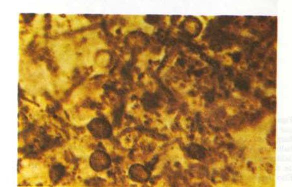


Figura 16-4. Fotomicrografía de horsteno de pedernal mostrando un organismo al que Barghoorn le asigna el género Eoastrion, estrella matutina. Se ve como radian irregularmente filamentos oscuros pequeños de cuerpo central. El objeto entero se muestra aquí encapsulado en una vaina de unos micrómetros de tamaño. (Cortesía del Profesor Elso Barghoorn, de la Universidad de Harvard.)

Figura 16-5. Fotomicrografía de algunas otras especies de Eoastrion tomadas de horsteno de pedernal. (Cortesía del Profesor Elso Barghoorn, de la Universidad de Harvard.)



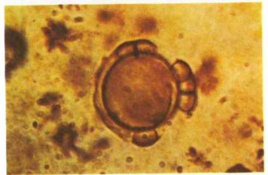


Figura 16-6. Fotomicrografía de Archaeorestis schreiberensis de Barghoorn, que viene a decir antiguo filamento en forma de soga de Schreiber, Ontario, de Barghoorn. La estructura es ramificada y tubular, con ocasionales estructuras bulbosas. Archaeorestis, como todos los demás organismos de este grupo, probablemente es un género extinguido. Los filamentos tienen unos micrómetros de diámetro, pero pueden ser de cientos de longitud. (Cortesía del Profesor Elso Barghoorn, de la Universidad de Harvard.)

Figura 16-7. Fotomicrografía de un organismo hallado en horsteno de pedernal. Se llama Eosphaera tyleri de Barghoorn, que quiere decir, más o menos, esfera matutina, hallada por el geólogo americano Dr. Stanley Tyler de la Universidad de Wisconsin y por el profesor Barghoorn. Contemplamos aquí un corte de Eosphaera. El examen tridimensional muestra que Eosphaera es realmente dos esferas concéntricas. Las paredes interior y exterior están conectadas por esferoides menores, de los cuales se ven seis en esta representación en la que se ha roto parte de la esfera externa. El diámetro típico de la esfera externa es de unos 20 micrómetros. (Cortesía del Profesor Elso Barghoorn, de la Universidad de Harvard.)

vechar las grandes cantidades de oxígeno libre recién disponible por la fotosíntesis vegetal, tal como ha sugerido el geofísico americano Lloyd V. Berkner.

≪ Los tiempos necesarios para establecer las normas químicas fundamentales y la organización estructural de la vida terrestre, seguramente fueron mucho más largos que los necesarios para la elaboración de variaciones tales sobre el mismo tema, como los microbios, los arces, las mantis y los hombres.

17

Síntesis química y principio de la evolución de la vida

. . . Se dice con frecuencia que están presentes hoy todas las condiciones para la autoaparición de cualquiera de los organismos vivos que existen o han existido. Y que si (y ¡Oh! ¡Qué gran si!) pudiéramos crear un pequeño estanque caliente, con toda clase de sales de amoníaco y fósforo, luz, calor, electricidad, etc, y que por reacción química se formara un compuesto proteínico listo para sufrir todavía cambios más complejos, en los momentos actuales tal sustancia sería instantáneamente devorada y absorbida, lo cual no pudo ser el caso antes de que se formaran las criaturas vivientes.

Charles Darwin (1871)

Una gallina no es más que un medio del huevo para hacer otro huevo.

Samuel Butler, *Life and Habit* (1) (1877)

1.- N. del T. *La vida y la costumbre,* obra inconformista contra Darwin. Samuel Butler, inglés (1835-1902), escritor, eclesiástico, ganadero, pintor. Gran satírico de las costumbres y prejuicios de la Inglaterra de su tiempo, escribió obras y novelas sobre distintos temas, prevaleciendo la ironía.

≪ Hace 4500 millones de años no había vida en la Tierra. En ninguna parte: ni en la atmósfera primitiva, ni en los océanos originales, ni en la corteza recién formada. Ni siquiera se encontraba el microorganismo más simple y más insignificante. Dos mil millones de años más tarde la Tierra era prolífica en organismos unicelulares de complejidad apreciable. Como hemos visto en el capítulo anterior, el origen de los primeros sistemas biológicos tuvo que haber ocurrido dentro de los mil primeros millones de años de formación de la Tierra. ¿Cómo? ¿Fue un raro acontecimiento que, para nuestro bien, tuvo lugar por casualidad en este pequeño rincón del universo y no en otro sitio? ¿O fue el origen de la vida un acontecimiento verosímil a partir de la física y química de las condiciones terrestres primitivas producido solamente al cabo de mil millones de años de reacciones moleculares normales?

≪ Es cierto que con el transcurso del tiempo puede suceder casi cualquier concatenación caprichosa de moléculas por complicada que sea. Pero ¿ocurrirá la concatenación apropiada de moléculas –de ácidos nucleicos y proteínas, por ejemplo– en el tiempo disponible? Supongamos, por ejemplo, que la probabilidad para el origen del primer sistema autorreplicativo en el ambiente primitivo de un año dado fuera de 10^{-6}. Luego la probabilidad de que tuviera lugar el origen de la vida en un siglo determinado de aquella era tendría que haber sido de $10^{-6} \times 10^{2} = 10^{-4}$, que es un valor muy pequeño. Pero en 10^{9} la probabilidad se aproxima mucho a la unidad y podemos referirnos al origen de la vida como si fuera un "suceso a la fuerza", es decir, el resultado más probable de las interacciones químicas de la Tierra primitiva.

≪ Supongamos ahora que la probabilidad para el origen espontáneo de la vida en un año cualquiera dado de esa Tierra primitiva fuera de 10^{-12}. Entonces, incluso al cabo de 10^{9} años, la probabilidad de que aparecieran sistemas biológicos, sería de $10^{-12} \times 10^{9} = 10^{-3}$, que es un número muy pequeño. En este caso, diríamos que el origen de la vida fue un suceso sumamente improbable en el tiempo disponible al principio de la historia de la Tierra y que hay vida aquí nada más que por pura casualidad. No sabemos cuáles son realmente esas probabilidades, pero son de determinación viable por investigación experimental. Si resulta que esa probabilidad es grande, podemos concluir que el origen de la vida es un acontecimiento probable en muchos planetas; si resulta pequeña, tendremos que aceptar que, excepto por posibilidades tales como la panspermia o la colonización intencionada, el universo tiene una densidad de población muy baja.

≮ Hace unos cuantos años estaba en boga opinar que las probabilidades eran muy pocas. Le Compte de Noüy, calcula en su obra *Destino humano* la probabilidad de que una serie de aminoácidos dispuestos en un orden cualquiera reproduzca una proteína determinada; en el capítulo 14 hemos realizado un cálculo parecido para determinar nuestra improbabilidad. Si la longitud de la proteína en cuestión es de 100 aminoácidos y cada una de sus posiciones puede estar ocupada por uno cualquiera de los 20 aminoácidos proteínicos comunes, entonces, la ocasión de formación aleatoria de la proteína dada es una entre 20^{100}, del orden de 10^{130}; más que un googol. Le Compte de Noüy dice que un suceso así es de probabilidad tan remota, que ni siquiera se habría producido y concluye que el origen de la vida necesitó de la intervención divina.

≮ Pero hay otras posibilidades. En el capítulo 14 hemos visto que la selección natural hace las veces de criba de probabilidades, extrayendo las estructuras y funciones que perfeccionan la adaptabilidad del organismo al medio ambiente. ¿Y acerca del origen de las primera proteínas o de los primeros ácidos nucleicos? ¿Tienen que haber sido formaciones *casuales* de sus respectivos bloques constructivos, los aminoácidos y los nucleosidofosfatos? ¿O podría ser que las moléculas que aparecieron espontáneamente en el medio ambiente primitivo fueran las que luego se utilizaron para el origen de la vida?

≮ Los organismos contemporáneos tienden a estar formados por un 90% de agua y en esto, el hombre no es ninguna excepción. El agua es, con mucho, la molécula más corriente en la superficie de la Tierra. Es evidente que la vida se valió de los bloques constructivos disponibles. Sin embargo, la arena (SiO_2) también es muy abundante y en cambio la aprovechan pocos organismos y no de forma bioquímica o metabólica, sino tan sólo estructuralmente. Los ácidos nucleicos están compuestos exclusivamente de carbono, nitrógeno, oxígeno, hidrógeno y fósforo. Los cuatro primeros átomos figuran entre los más abundantes del universo, tal como vimos en el capítulo 4; en cambio, el fósforo, es más bien raro. Las proteínas están formadas por carbono, nitrógeno, oxígeno, hidrógeno y azufre. También en este caso, el azufre es relativamente raro. Podemos suponer que los sistemas biológicos han utilizado, siempre que les ha sido posible, los átomos y moléculas sencillas de mayor abundancia. No obstante, no suele ser lo mismo lo más abundante que lo más conveniente. Así, hay algunos átomos o moléculas corrientes que no se han incorporado a los sistemas biológicos, mientras que otros que no son corrientes han sido extraídos selectivamente del medio ambiente.

≮ Por ventura, algunas de las moléculas más abundantes, especialmente el agua, parecen peculiarmente bien adaptadas para su incorporación a los seres vivos. En el libro titulado *The Fitness of the Environment*, aparecido en 1913, Lawrence J. Henderson, bioquímico de la Universidad de Harvard, se extiende bastante sobre las propiedades saludables del agua. Para el origen y desarrollo de la vida necesitamos un medio líquido (o en el peor de los casos un gas muy denso) en el cual puedan tener lugar las interacciones moleculares. Para la estabilidad biológica, el medio tendría que conservarse líquido en un amplio margen de temperaturas, variando la suya propia tan sólo perezosamente al calentarse o enfriarse. Henderson suponía, además, que tenía que ser conveniente que el líquido pudiera disolver sales y participar en una química ácido-base. El agua comparte todas estas propiedades y, en algunos casos, en mayor grado que cualquier otra molécula corriente; Henderson se sorprendió por la aparente preadaptación del agua para su función biológica y presumió que valía la pena investigar esa coincidencia. Otros han aplicado los argumentos de Henderson para llegar a la conclusión de que el origen de la vida sucedió por designio. Henderson también trató de la "adecuación" del carbono, del oxígeno y de otros átomos y moléculas para las funciones fundamentales que desempeñan en la bioquímica contemporánea.

≮ Esta cuestión de la adaptabilidad del medio ambiente da cierta luz a los problemas inherentes a la extrapolación de un ejemplo sencillo. Estamos dándole vueltas a los compuestos orgánicos basados en agregados de carbono en un sistema disolvente de agua líquida. ¿Será quizá que en nuestro juicio estamos predispuestos a que los seres vivos tienen que ser a base de carbono y agua? El químico americano George Pimentel, de la Universidad de California en Berkeley, ha dicho que la adaptabilidad del agua y del carbono puede ser ilusoria; tan sólo producto de nuestra limitación imaginativa biológica y de la uniformidad histórica de la bioquímica terrestre. Algunas disoluciones de hidrocarburos tienen amplios márgenes líquidos y adecuadas estabilidades térmicas. La capacidad para disolver sales o para participar en química ácido-base no es un requisito previo para la complejidad molecular y se pueden imaginar muchas otras alternativas. A bajas temperaturas, hay compuestos de silicio que son muy estables y que pueden generar complejos tan grandes como los compuestos de carbono. Sin embargo, a temperatura ambiente, no tienen ni siquiera estabilidad para poderse comparar con ellos. En presencia de agua líquida muchos de ellos tienden a disociarse. Por otra parte, son mucho más estables a la luz ultravioleta que la mayoría de los compuestos de carbono. Así pues, las bioquímicas basadas en el silicio pueden ser apropiadas en ambientes a baja temperatura, no acuosos y con altos flujos ultravioletas. Pimentel ha indicado que son muchas las reacciones químicas conocidas que tienen lugar a velocidades aceptables biológicamente a temperaturas muy bajas. Sin embargo, a temperatura ambiente, se producen tan deprisa que sólo vemos los productos de la reacción y que tienden de por sí a perderse de vista de ella. Así pues, aunque las reacciones químicas se realizan mucho más lentamente cuando desciende la temperatura, existen algunas que son bastante rápidas a bajas temperaturas y lo mismo puede decirse respecto a las temperaturas altas. Estamos tan sólo empezando a explorar otras posibilidades bioquímicas y es todavía muy prematuro aventurar que la nuestra es la única bioquímica o que es la mejor de todas.

⩽ Nuestro gran contenido en agua ha sugerido a muchos biólogos que la vida en la Tierra surgió de los océanos. En realidad, hay cierta correspondencia entre el contenido en elementos tales como el calcio y el potasio en el agua de mar y en la sagre y los tejidos. Esta es nuestra primera sugerencia de que los seres vivos tienden a incorporarse al medio ambiente primitivo, por lo cual su *milieu intérieur* tendería a parecerse a los entornos comunes de la historia primitiva de la vida, posibilidad que el primero que la vislumbró fue el fisiólogo francés del siglo XIX Claude Bernard.

⩽ Antes de 1953 se habían hecho varios ensayos para simular el medio ambiente primitivo de la Tierra y sintetizar moléculas orgánicas, pero los resultados fueron desalentadores. En muchos de los primeros experimentos las condiciones generales no eran reductoras. Por ejemplo, se emplearon mezclas de H_2O, CO_2 y N_2 que se irradiaron con electrones de energía alta, pero sólo se obtuvieron moléculas orgánicas muy sencillas, como formaldehído y aún éstas en muy poca cantidad.

⩽ Pero en 1953, en la Universidad de Chicago, se dio un gran paso hacia adelante. Habiéndose autoconvencido el químico americano Harold C. Urey (2) de que el sistema solar nació en condiciones reductoras, se interesó por el problema del origen de la vida. El colaborador de Urey, Stanley L. Miller, preparó una mezcla de metano, amoníaco, agua e hidrógeno para simular la atmósfera primitiva. La idea era dar energía a esa mezcla y determinar si se producían moléculas orgánicas en cantidad detectable. De entre las fuentes de energía que parecían ser posibles en aquellos primeros tiempos y capaces de producir reacciones orgánicas de síntesis, la elección más clara fue por la radiación ultravioleta solar. No obstante, resulta más bien difícil trabajar en laboratorio con luz ultravioleta, porque los utensilios de cristal empleados normalmente son opacos a esta clase de luz. (Esta es la razón por la que resultan difíciles las quemaduras de Sol tras unos cristales.) En consecuencia Urey y Miller usaron una descarga eléctrica; entre dos electrodos introducidos en lo que simulaba la atmósfera primitiva, pasaron electrones de energía alta, cuyo flujo constituye una buena simulación del rayo. Si en la Tierra primitiva había agua, es de suponer que también había nubes y existiendo éstas, tenían que producirse descargas eléctricas entre las nubes y el suelo, es decir, tenía que haber rayos. En el experimento se hacía circular el gas, de modo que una vez saltada la chispa se pasaba por un baño de agua y los productos orgánicos que se producían en el gas se disolvían en el líquido, donde eran posibles ulteriores reacciones. Después de una semana de descargas de chispas, el líquido tomó un color pardo profundo. Era claro que se estaban formando nuevas moléculas a base del metano, del amoníaco, del agua y del hidrógeno. ¿Pero cuáles? ¿Eran orgánicas?

2.- N. del T. Harold Clayton Urey. Descubridor del agua pesada y del deuterio. Premio Nobel de química de 1934. Copartícipe de la preparación de la bomba atómica.

⩽ Para analizar la composición de su mezcla, Miller y Urey emplearon un método analítico denominado cromatografía (con papel poroso) que, con pequeñas variaciones se ha empleado luego mucho en trabajos experimentales sobre el origen de la vida. Si se introduce un papel secante blanco por el cuello de un tintero, la tinta asciende por el papel hasta cierta altura, a la que se para por las interacciones moleculares entre la tinta y el papel. La tinta es atraída hacia arriba hasta cierta altura por la capilaridad del papel poroso y de ahí no pasa. Si se realiza este sencillo experimento, se observará que la tinta se separa en sus componentes - la parte sólida o pigmento y el disolvente - porque el papel los atrae con distinta fuerza. Este es un ejemplo simple de cromatografía sobre papel. En la práctica normal de laboratorio se coloca la muestra del producto a analizar en la esquina de una hoja de papel cromatográfico, que es similar al papel de filtro. Se coloca luego aquél en un disolvente orgánico que lo invade y arrastra consigo cierta distancia característica la muestra en ensayo. Se dobla entonces el papel en ángulos rectos y se sumerge en otro disolvente que arrastra la muestra en dirección normal a la anterior. El procedimiento suele ser adecuado para separar muchas muestras desconocidas en manchas discretas sobre el cromatograma. Empleando el mismo papel y los mismos disolventes, las distintas moléculas orgánicas de la muestra en ensayo irán a parar a posiciones características sobre el papel. Si las manchas son coloreadas, de por sí, como la tinta o, extrínsicamente, por rociado, se pueden determinar sus posiciones y averiguar la composición de la muestra. Las emulsiones fotográficas son muy sensibles a los electrones que se emiten durante la desintegración radiactiva. Así pues, cuando la obtención que se espera es muy pequeña, los átomos de uno de los reactivos originales —el metano, por ejemplo— se puede marcar con un isótopo radiactivo, como el carbono^{14} radiactivo en lugar de con el C^{12} ordinario. El carbono^{14} esta sometido a desintegración radiactiva liberando un electrón de su núcleo (un neutrón que se transforma en un protón y un electrón) que se escapa de la molécula. Este electrón es capaz de impresionar un grano de una emulsión fotográfica. En consecuencia, los compuestos recién formados, aunque sean en cantidades mínimas, cuyos átomos están así marcados se pueden detectar colocando el papel con el cromatograma sobre una película de rayos X y revelando luego ésta. Las moléculas marcadas recién formadas, en efecto, se retratan por sí solas.

⩽ La figura 17-1 es un ejemplo de negativo de radiograma revelado. La mancha más oscura en el medio de las otras manchas se debe a la molécula de adenina, marcada con C^{14}. La adenina había sido mezclada con ribosa y ácido fosfórico e irradiada con luz ultravioleta durante dieciocho horas. Los productos se pasaron luego por dos sistemas disolventes y el cromatograma bidimensional resultante se colocó contra una película dando el resultado que aparece en la figura. Cada una de las manchas, aparte la de adenina, corresponde a una molécula orgánica sintetizada en este experimento. Muchas de las moléculas que se ven en la fotografía aún no se han identifi-

cado. Este cromatograma se obtuvo con la colaboración de la Sra. Elinore Green en mi laboratorio del Observatorio Astrofísico Smithsoniano.

≪ Empleando papel corriente de cromatografía, con un tinte de color, Miller y Urey encontraron que habían producido, en gran cantidad, muchos aminoácidos, que son los bloques constituyentes de las proteínas. Se formaron además otras moléculas orgánicas, muchas de las cuales participan también en los procesos biológicos contemporáneos, aunque algunas, como la urea, lo hacen principalemente como productos finales. Alrededor del 85 por ciento de los productos que se formaron en el experimento permanecen todavía hoy sin identificación. Algunos se cree que son azúcares; otros son largos, polímeros como el almidón, a los cuales se debe el color pardo intenso que tomó la solución acuosa a la semana de experimentación.

≪ El experimento original de Miller y Urey lo ha confirmado también el geoquímico americano Philip H. Abelson, de la Institución Carnegie, de Washington. Mediante descargas eléctricas sobre una amplia variedad de mezclas de gases, encontró que mientras que las condiciones netas fueran reductoras, se podía substituir el CH_4 por CO_2 o el NH_3 por N_2 y seguir produciendo los aminoácidos y los demás productos que obtuvieron Miller y Urey. Sin embargo, tan pronto como las condiciones netas se hacen oxidantes desaparece por completo la síntesis orgánica. Esta es una prueba confirmativa, muy interesante, de que para la síntesis prebiológica a gran escala de las moléculas orgánicas se necesitaban condiciones reductoras.

≪ Más tarde, en 1959, los químicos alemanes W. Groth y H. von Weyssenhoff, de la Universidad de Bonn, demostraron que la radiación ultravioleta a longitudes de onda que fueran absorbidas por la mezcla de gas, daban resultados semejantes a los de Miller y Urey. La luz ultravioleta es bastante efectiva para producir moléculas orgánicas a partir de mezclas de etano, amoníaco, agua e hidrógeno. La producción cuántica es una magnitud que expresa el número de moléculas orgánicas de un tipo dado producidas por cada fotón de luz ultravioleta absorbido por el gas. Groth y Von Weyssenhoff hallaron producciones cuánticas características del orden de 10^{-5} a 10^{-6}; es decir, que se necesitan de 100000 a 1000000 fotones para la

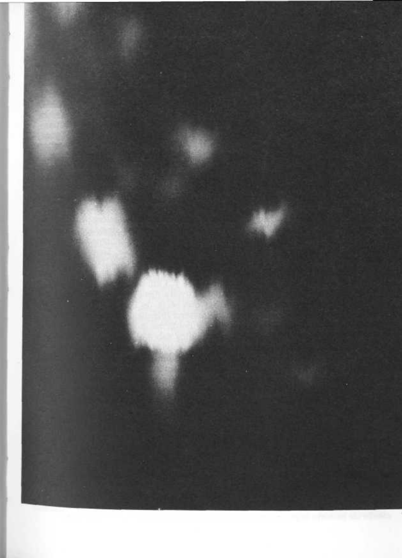


Figura 17-1. Ejemplo de cromatograma autorradiográfico bidimensional. La mancha más oscura corresponde a la molécula marcada empleada como punto de partida en el experimento. Las otras manchas, muchas de ellas no identificadas, corresponden a moléculas orgánicas nuevas sintetizadas en el experimento.

obtención de una molécula orgánica determinada, como de aminoácidos, por ejemplo. En los últimos experimentos se han encontrado producciones cuánticas semejantes, de las que trataremos ahora, en la síntesis ultravioleta de los precursores del ácido nucleico.

⩽ Si conocemos la producción cuántica, podemos, en principio, calcular la cantidad total de materia orgánica formada mientras la Tierra retuvo su atmósfera reductora. Una masa típica de 10^{-22} g es clásica de una molécula sencilla sintetizada en las condiciones primitivas. Con una producción cuántica de 10^{-5}, tenemos $10^{-5} \times 10^{-22} = 10^{-27}$ g de materia orgánica producida por fotón absorbido. Un valor típico de flujo fotónico ultravioleta en la parte alta de la atmósfera terrestre en los tiempos primitivos es de 3×10^{14} fotones cm^{-2} s^{-1}. Es decir, cada centímetro cuadrado de la Tierra recibía 3×10^{14} fotones ultravioletas por segundo. Puesto que cada fotón producía 10^{-27} g de materia orgánica, el total de flujo ultravioleta solar producía por segundo $10^{-27} \times 3 \times 10^{14} = 3 \times 10^{-13}$ g sobre cada centímetro cuadrado. Si la primitiva atmósfera reductora de la Tierra duró 3×10^{8} años (unos 10^{16} segundos), en tal caso tuvo que producirse por radiación ultravioleta un total de $3 \times 10^{-13} \times 10^{16} = 3 \times 10^{3}$ g de materia orgánica en cada centímetro cuadrado de la superficie de la Tierra, es decir, tres kilogramos por centímetro cuadrado, que es una cantidad apreciable. La profundidad media actual de los océanos es del orden de 3 km, o sea 3×10^{5} cm. Como el agua tiene una densidad de 1 g cm^{-3}, hay 3×10^{-5} g de agua en una columna de un centímetro cuadrado de base y 3 km de altura. Así si toda la materia orgánica de la Tierra primitiva estuviera disuelta en los océanos de hoy, tendríamos una disolución acuosa que sería de $3 \times 10^{3}/(3 \times 10^{5}) = 10^{-2}$, es decir, del uno por ciento de materia orgánica, lo que corresponde a la consistencia de un consomé ligero y confirma la suposición expresada por J. B. S. Haldane en sus primeros artículos sobre el origen de la vida, de que los sistemas biológicos surgieron de una "sopa clara, caliente".

⩽ Desde los experimentos de Urey y Miller, se han realizado muchos más y obtenido moléculas orgánicas más complejas de forma semejante. Hasta ahora, se ha aderezado la sopa según la siguiente receta: empezar con metano, amoníaco, agua e hidrógeno y ver qué moléculas sencillas se producen en agua líquida (por ejemplo, aminoácidos) o en el gas cuando no hay agua líquida (por ejemplo, aldehídos y cianuro de hidrógeno). Tomar entonces esas moléculas, mezclarlas todas y dar más energía. Tomar los productos de esta segunda fase y emplearlos como reactivos para la tercera. Continuar hasta que aparezca la molécula que se esté buscando. Se han utilizado distintas fuentes de energía: protones y electrones de energía alta, luz ultravioleta, rayos X, rayos gamma y calor. Algunas de ellas –los electrones y la radiación ultravioleta en especial– son simulaciones posibles del entorno primitivo de la Tierra; los demás no. En algunos experimentos, se han empleado concentraciones de materia orgánica fuera de toda lógica, como si los océanos hubieran estado entonces formados por un 50 por ciento de materia orgánica en vez de, quizá, un uno por ciento o menos.

⩽ En el mejor de los casos, las simulaciones son inexactas. Por ejemplo, se emplean reactivos puros, mientras que en las condiciones primitivas no eran químicamente puros. Es, desde luego, imposible para nosotros saber con detalle las condiciones químicas y físicas de toda la superficie de la Tierra de hace unos 4×10^{9} años. Así pues, las reacciones químicas que tienen lugar en esos estudios no pueden simular exactamente las que ocurrieron en la Tierra primitiva.

⩽ Como otro ejemplo, la fuente de energía empleada para la formación de la molécula que se busca, tiende a su vez a destruirla. La luz ultravioleta de longitud de onda corta, por ejemplo, disociaría los aminoácidos. Para evitar esa destrucción, los investigadores separan las moléculas producto de la fuente de energía. Esta es la razón por la cual se hace circular el gas a través de un medio líquido en el experimento de Urey y Miller. En los realizados con luz ultravioleta o con calor, la fuente de energía puede simplemente apartarse una vez sintetizados los productos deseados. Las condiciones ambientales primitivas de la Tierra no eran tan serviciales como los químicos orgánicos, se comprende, quieren para analizar su producto antes de que se destruya.

⩽ El relámpago de un rayo, se produce y termina; no es probable que las moléculas sintetizadas por un rayo sean destruidas luego por otro. Pero con luz ultravioleta, las moléculas sintetizadas están, por lo general, más expuestas a la disociación que las moléculas precursoras. ¿Fue, pues, la luz ultravioleta una fuente de energía inaprovechable en los tiempos primitivos, porque las moléculas sintetizadas se destruían antes de que tuvieran oportunidad de seguir reaccionando y formar moléculas de interés biológico? No, si el origen de la vida tuvo lugar en los océanos. Unas pocas decenas de metros de agua líquida pura hubieran absorbido esencialmente toda la luz ultravioleta incidente sobre la superficie de las aguas en aquel tiempo. A medida que aumentaba en el agua el contenido de materia orgánica, las moléculas orgánicas de la parte alta del océano apantallaban a las que estaban unos pocos centímetros más abajo y evitaban los efectos disociadores de la luz ultravioleta. Dado que la atmósfera primitiva era reductora, no podía formarse ozono que absorbiera la luz ultravioleta. Por esta razón, yo creo que la luz en las proximidades del intervalo de longitudes de onda entre 2400 y 2900 Å penetró en la superficie de las aguas en los tiempos primitivos. Al tener lugar la transición a una atmósfera de oxígeno, el ozono sólo se produjo lentamente por interacciones de átomos y moléculas de oxígeno y que con el tiempo, se formó suficiente ozono para establecer una especie de manto molecular a una altura de unos 40 km, que nos protege hoy de los efectos perniciosos de la luz ultravioleta. Parece probable que en los tiempos primitivos, la capa absorbente ultravioleta fuera la superficie del océano y no la parte alta de la atmósfera.

⩽ Podemos ya representarnos la Tierra primitiva de hace 4000 a 4500 millones de años: Una atmósfera reductora y masas de agua, ambas a partir

de los gases emanados del interior. Suceden entonces los cambios tectónicos más importantes; se forman los continentes; debido al aumento de la gravedad y de la radiactividad, la Tierra pudo haber estado, al menos en algunas épocas y lugares, mucho más caliente que hoy. Durante las tormentas, los rayos atraviesan la atmósfera y, durante el día, parte de la luz ultravioleta del Sol pasa a través de la misma y es absorbida por el océano. La atmósfera está compuesta de metano, amoníaco, agua y ligeras trazas de hidrógeno. Pronto, el amoníaco es disuelto en los océanos, donde forma hidróxido amónico (NH_4OH) que hace que aquéllos sean alcalinos. La atmósfera pudo también haber contenido cantidades relativamente grandes de los gases no reactivos nitrógeno y helio. Debido a las interacciones químicas, la atmósfera contenía pequeñas cantidades de aldehídos y cianuro de hidrógeno y, los acéanos, aminoácidos. En tal estado, ¿qué más podía ocurrir?

⩽ Los pasos siguientes de la síntesis orgánica prebiológica, ulterior a los experimentos de Miller y Urey, se realizaron en los Estados Unidos en la década de 1960, principalmente en los laboratorios del bioquímico español-americano Juan Oró, (3) en la Universidad de Houston, el químico ceilanés-americano Cyril Ponnamperuma, del Centro de Investigación Ames de la NASA, el químico americano Melvin Calvin, de la Universidad de California, en Berkeley y el químico americano Sidney W. Fox, de la Universidad de Miami.

⩽ En los experimentos ideados para simular las condiciones primitivas, estos investigadores han logrado producir los azúcares de cinco carbonos, ribosa y desoxirribosa, la de seis carbonos, la glucosa; las bases de los ácidos nucleicos, adenina, guanina y uracil y polipéptidos –cadenas largas de aminoácidos que, al menos en algunas propiedades químicas generales, recuerdan a las proteínas.

⩽ Más recientemente, Ponnamperuma y yo hemos producido nucleosidofosfatos –los bloques constructores de los ácidos nucleicos, simulando las condiciones primitivas. La exposición razonada de estos experimentos es como sigue: no habiendo ozono en la Tierra primitiva, es de suponer que la luz ultravioleta traspasaba la atmósfera y llegaba a la superficie de las aguas en la región de los 2400 - 1900 Å intervalo de longitud de onda de la luz ultravioleta que es deletérea para los organismos contemporáneos. (Las lám-

3.- N. del T. Juan Oró, natural de Lérida, (1923), químico por la Universidad de Barcelona en 1947. Desde 1955 en EE. UU. Fue nombrado catedrático de la Universidad de Houston en 1963. Dedicado principalmente a la investigación del origen de la vida, síntesis no biológicas de bases púricas (guanina, adenina), azúcares (desoxirribosa), aminoácidos y polipéptidos y al análisis de los compuestos orgánicos de meteoritos, hallazgos precámbricos y rocas lunares.

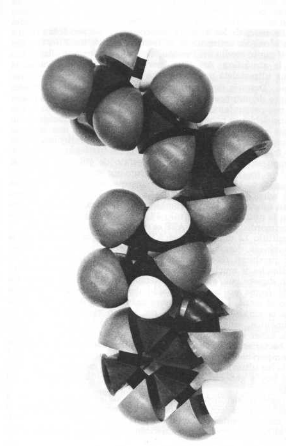


Figura 17-2. Modelo molecular de la molécula de adenosintrifosfato (ATP). Los diferentes átomos están representados por componentes de diferentes formas y colores. El anillo de los seis átomos en forma de cuña de la izquierda de la figura representa la molécula de adenosin. La "cola" de moléculas oscuras de la derecha es el grupo trifosfato y entre ambos está el azúcar ribosa.

paras germicidas emiten luz ultravioleta a esas longitudes.) El daño del ultravioleta sucede porque ciertos grupos moleculares de los organismos actuales absorben con preferencia esas longitudes de onda. Los principales absorbentes son las bases de los ácidos nucleicos que absorben sobre todo a unos 2600 Å. En el medio ambiente de la Tierra primitiva, los 2600 Å están precisamente en el punto medio del "viento" de longitud de onda ultravioleta transmitido por la atmósfera. Así pues, por una curiosa coincidencia, se disponía de la luz ultravioleta precisamente a las longitudes de onda a que absorben las bases. Después de averiguar que en las condiciones simuladas del medio ambiente de entonces se producían las bases y los azúcares ribosa y desoxirribosa, nos preguntamos qué sucedería en presencia de fósforo. Los océanos primitivos debieron haber tenido disueltos en ellos pequeñas cantidades de fosfatos y otros compuestos de fósforo. Así, en una serie de experimentos, preparamos una disolución diluída basada en adenina, ribosa y un compuesto fosforoso, que en unos experimentos fue ácido fosfórico y, en otros, el compuesto más complejo, metafosfato de etilo. Se marcó la adenina con C^{14} y los productos se analizaron por cromatografía sobre papel autorradiográfico. Uno de los compuestos que se produjo en mayor cantidad fue el adenosintrifosfato, ATP. La figura 17-2 es un modelo molecular de esta substancia. Es una combinación de adenina, ribosa y tres fosfatos y, según la notación del capítulo 14, puede escribirse como A-S-P-P-P. La síntesis primordial posible del ATP es importante en dos aspectos.

⩽ En el capítulo 14 dijimos que el ATP está siempre presente en las células contemporáneas, donde hace las veces de fuente de energía corriente. Hoy el ATP lo producen directamente las plantas por fotosíntesis y lo sintetizan los animales y muchos microbios a partir de los alimentos. Pero este experimento sugiere que, en aquellos tiempos, el ATP pudo producirse "libremente", de forma no biológica, caído del cielo sobre los primeros organismos como el maná. Las producciones cuánticas de ATP debieron ser tan elevadas, si la síntesis primitiva era del mismo rendimiento que en nuestros experimentos, que cada centímetro cuadrado de los océanos primitivos podía haber soportado, indefinidamente, en esencia, una población de 20000 bacterias, cada una con tiempos de generación y requisitos de energía contemporáneos empleando como única fuente de energía el ATP sintetizado por la luz ultravioleta. Así pues, la elaborada máquina metabólica que se consagra hoy a generar ATP, pudo no haber sido necesaria en los albores de la vida.

⩽ El otro aspecto significativo del ATP es que es un precursor en la síntesis de los ácidos nucleicos de las células contemporáneas. Uno de los logros recientes más excitantes en bioquímica ha sido la síntesis de RNA en laboratorio por el bioquímico hispano-americano Doctor Severo Ochoa (4),

4.- N. del T. Severo Ochoa.- Médico español (1905) por la Universidad de Madrid (1929). Amplió sus estudios en Alemania hasta 1931, que regresó a España y fue nombrado

en la Universidad de Nueva York, y la de una clase de DNA por el bioquímico americano Arthur Konberg (5), actualmente en la Escuela de Medicina de la Universidad Stanford, junto con sus colaboradores. En ambos casos, los experimentos se hicieron con nucleosidofosfatos, algunas sustancias inorgánicas, como magnesio y una enzima de origen biológico. Para la síntesis del RNA, la enzima se denomina polinucleotidofosforilasa; para la del DNA, DNA polimerasa. Imaginemos una disolución diluida de nucleosidotrifosfatos, magnesio y, por ejemplo, DNA polimerasa. Kornberg halló que en poco tiempo se habían sintetizado mayores cantidades de una molécula que, en muchos aspectos, se parece al "disparador" del DNA original. Para el RNA, el caso es análogo. Imaginemos ahora que se repite el experimento, pero sin el disparador. ¿Qué sucede? De momento, nada, pero pronto se hace evidente una síntesis lenta de un ácido nucleico, incluso faltando el disparador. Esas polimerizaciones espontáneas pueden ocurrir lo mismo para el RNA que para el DNA. El DNA sintetizado puede ser de un tipo muy sencillo y repetitivo (vg. ATATATAT. . .) y, sin embargo, resulta ser DNA.

⩽ Para mejor simular las condiciones primitivas, imaginemos que realizamos el mismo experimento, pero esta vez sin disparador ni enzima. Ahora no sucede nada perceptible. ¿Por qué? ¿Cuál es la función de la enzima? Las enzimas son catalizadores que aumentan la velocidad, pero no el sentido de una reacción química. Esto quiere decir que en ausencia de DNA polimerasa, los nucleosidotrifosfatos se unirán espontáneamente, o polimerizarán pero con una escala de tiempos mucho más larga que en presencia de la enzima. No sabemos cual es la velocidad de la polimerización espontánea de los nucleosidotrifosfatos en ausencia de la enzima apropiada, pero supongamos que necesite 1000 años. Es obvio que no podemos realizar en laboratorio ese experimento práctico sin la enzima. En realidad, la enzima es el instrumento de laboratorio que nos hace falta. Podemos aprovecharnos de la enzima para el tiempo geológico.

⩽ Si la polimerización espontánea de los nucleosidotrifosfatos en ácidos nucleicos tarda más de –digamos– 10^8 años, podemos llegar a la conclusión

profesor de fisiología del Hospital de San Carlos. De 1936 a 1937, de nuevo en Alemania. En 1937, marcha a Inglaterra al laboratorio de bioquímica de Oxford. Desde 1941, en Estados Unidos, como profesor de bioquímica. En 1958 toma la ciudadanía americana. Su logro principal ha sido la síntesis del *RNA*, hallazgo que le valió el premio Nobel de Medicina de 1959.

5.- N. del T. Arthur Kornberg (1918). Biólogo y doctor en Medicina. Profesor de bioquímica de la Universidad Stanford. Copartícipe con el Dr. S. Ochoa del premio Nobel de Medicina por sus trabajos, independientes a los de Ochoa, sobre la síntesis de los ácidos nucleicos. Su hallazgo principal fue el descubrimiento de una enzima que cataliza el DNA.

de que los primeros ácidos nucleicos no surgieron por polimerización espontánea de nucleosidofosfatos. Pero si realmente los ácidos nucleicos se polimerizan espontáneamente –en tiempos que resultan cortos comparados con el geológico, pero largos comparados con la vida humana– podemos plantearnos un problema desconcertante en otro aspecto, Como ya mencionamos en el capítulo 14, las proteínas se forman en los sistemas biológicos contemporáneos sólo por ácidos nucleicos. Una enzima tal como la DNA polimerasa, es una proteína. Así, necesitamos ácidos nucleicos para formar proteínas y proteínas para formar ácidos nucleicos. Una salida de este tráfico biológico es la síntesis espontánea de los ácidos nucleicos en ausencia de proteínas.

⩽ En condiciones primitivas simuladas, se han producido ya nucleosidotrifosfatos precursores tanto de algunos DNA, como de algunos RNA. Nos podemos imaginar el origen de los ácidos nucleicos primitivos por polimerización espontánea de los nucleosidotrifosfatos sintetizados por luz ultravioleta en una masa primitiva de agua que tenía algún catalizador mineral, como, por ejemplo, magnesio. Una vez sintetizada la primera molécula de ácido nucleico, las síntesis sucesivas la usaron como disparador. En la Tierra al principio, tuvo que ocurrir un paso hacia la autorreplicación exacta del ácido nucleico, tal como sucede en los sistemas biológicos actuales. Después de la producción del primer polinucleótido, las generaciones posteriores de estos tuvieron que sufrir mutaciones, por interacción con la luz o con otras moléculas, o "espontáneamente". Algunos nucleosidotrifosfatos debieron desaparecer; otros debieron ser substituidos por las supresiones y aun más, en otros casos, debieron invertirse secuencias cortas de nucleosidotrifosfatos. Y para acabar, podemos suponer que el mar antiguo tuvo que estar bastante lleno de una variedad de ácidos nucleicos autorreplicativos.

⩽ Si ya sabemos ahora, en líneas generales, el origen del primer sistema de mutación, autorreplicativo, ¿no sabemos también el origen de la vida?. No, no del todo. No hay forma para que estos ácidos nucleicos primitivos controlen su medio ambiente inmediato de modo que aumente su replicación continuada. En las células contemporáneas, como hemos visto en el capítulo 14, hay un elaborado aparato en el que intervienen el RNA mensajero, el RNA adaptador, ribosomas y diversidad de enzimas especializadas, necesarios todos para que los ácidos nucleicos controlen la química de la célula. No podemos imaginarnos que esas moléculas complejas y accesorias específicas pudieran surgir espontáneamente en el medio ambiente primitivo. El aparato para la transcripción del código genético tiene que haber evolucionado por si solo, lentamente, a lo largo de los miles de millones de años de evolución.

⩽ El problema principal que resta en la investigación de laboratorio sobre el origen de la vida es el origen del código genético. Quizá los ácidos nucleicos son de por sí débilmente catalíticos; quizá los polinucleótidos tienen poca capacidad para ordenar a los aminoácidos según un código singlete, en vez del triplete contemporáneo. Puesto que los ácidos nucleicos primitivos tuvieron que estar compuestos, más o menos, de cuatro clases

de nucleosidotrifosfatos, esto lleva a que las primeras proteínas tan sólo contenían unos cuatro aminoácidos. Y con todo, el sitio activo –el lugar en las proteínas contemporáneas en que sucede la mayor parte del efecto catalítico– no suele contener más de cuatro clases diferentes de aminoácidos. Deberíamos tener presente que, incluso propiedades catalíticas mínimas confieren ventajas selectivas importantes y quizá decisivas, a los que las tengan, tras muchas generaciones.

⩽ Mucho se ha hecho sobre la producción de polipéptidos a partir de aminoácidos en condiciones que simulan el medio ambiente primitivo. Más recientemente, se ha obtenido una amplia gama de aminoácidos en disolución acuosa. Es posible que las variedades más predominantes de estos polipéptidos tengan débiles propiedades catalizadoras para promover las síntesis posteriores. Pero, como según nuestro mejor entender los polipéptidos no son autorreplicativos, la síntesis espontánea de los mismos en el medio primitivo no puede dar la respuesta a las cuestiones fundamentales sobre el origen de la vida.

⩽ Cabe concebir que el primer sistema molecular autorreplicativo capaz de evolucionar no fuera ni un ácido nucleico ni RNA ni DNA sino, más bien, alguna molécula extinguida biológicamente en la actualidad y sustituida hace ya mucho tiempo por el sistema autorreplicativo –más eficaz– que interviene en los ácidos nucleicos. Pero no hay ningún indicio de tal molécula y son pocos los que comparten esta hipótesis. En otros planetas, además de los ácidos nucleicos quizá haya otras moléculas que sean fundamentales para la autorreplicación, pero en la vida terrestre, nuestro único ejemplo de vida, parece orientado hacia los ácidos nucleicos y las proteínas.

⩽ Una vez se haya resuelto el problema de la interacción entre los ácidos nucleicos primitivos y los polipéptidos, también primitivos, se podrá casi asegurar que se ha sintetizado la vida en laboratorio. Como es lógico, nada que nos sea conocido como un oso hormiguero o una rana, sino, simplemente, un sistema molecular capaz de autorreplicación, mutación, replicación de sus mutaciones y cierto grado de control de las condiciones ambientales. Si llegamos a saber como llega a convertirse en ser un sistema molecular así, habremos empezado a comprender la larga cadena evolutiva desde los gases y aguas de la Tierra primitiva hasta el origen del hombre.

⩽ La síntesis de la vida en laboratorio, al menos en el sentido de sistema molecular *capaz* de evolucionar por selección natural, quizá se logre antes de diez años, hay algunos que dicen que ya se ha conseguido. Pero si esto es todo lo que hay respecto al origen de la vida, algunos pueden objetar, ¿no puede existir una estirpe de autómatas autorreplicativos? Ciertamente. Si nos imaginamos un medio ambiente lleno de brazos y piernas mecánicos, transistores, aparatos criógenos y de todo aquello que sea necesario para un robot versátil, incluso hoy se puede hacer uno que emplee esas piezas para hacer otro idéntico. Necesitaría un conjunto de instrucciones hereditarias sobre la forma de construir otro robot. Para ser capaz de evolucionar, habría que incorporar en la generación siguiente un cambio casual o accidental en

las instrucciones. Esto es, evidentemente, análogo al modus operandi biológico y tal analogía se puede hacer mecánicamente. A medida que pasara el tiempo, si no se acabaran las piezas de recambio, tendríamos un gran incremento en el número y variedad de robots.

Imaginemos ahora que se ha agotado el acopio de un bloque integrante determinado, por ejemplo, un brazo. Que todos los brazos desperdigados por el campo se han empleado ya para los robots. ¿Qué pasa? Pues que la reproducción de robots sufre un menoscabo, a menos que haya una mutación para transformar, digamos piernas mecánicas, de las que todavía se dispone, en brazos que hacen más falta. Con el tiempo, también las piernas acabarían gastándose. Si se desarrollara una mutación para hacer piernas a partir de otro artículo que estuviera en abundancia –digamos motores de automóviles para la chatarra– y que esas piernas entonces se convirtieran en brazos, es evidente que con tal adaptación podrían seguir los robots reproduciéndose. Con el tiempo, quizá llegaríamos a tener robots que sacaran el mineral de hierro de la mina, lo convirtieran en motores de chatarra, éstos en piernas y las piernas en brazos. La secuencia más eficaz sería directamente de mineral a brazo, pero los robots están encadenados a su historia y los pasos no pueden darse más que uno cada vez.

Los robots habrían desarrollado una cadena de reacciones análoga a la de las enzimas intermedias en los sistemas biológicos contemporáneos. El geneticista americano Norman Horowitz, del Instituto Tecnológico de California, fue el primero que apuntó que el origen de las cadenas de reacciones biológicas ocurrió de forma semejante a la de nuestro fantástico robot - que los bloques químicos constituyentes –moléculas orgánicas– fueron hechas "libres" esencialmente en el ambiente primitivo y utilizadas posteriormente en los primeros sistemas biológicos. Y cuando aumentó el número de éstos, la demanda de ciertas moléculas fundamentales como bloques constructivos superó a las existencias. Aquellos organismos que pudieron utilizar otra molécula corriente y no aprovechada anteriormente, y convertirla en la parte que hacía falta, tuvieron una clara ventaja sobre sus vecinos incapaces de efectuar tal transformación. Cada vez que una molécula necesaria iba desapareciendo, hubo que ir añadiendo un paso más en la larga cadena de reacciones. La hipótesis de Horowitz es una forma elegante y natural de entender el origen de las complejas cadenas de reacciones biológicas.

Si imaginamos un océano repleto de ácidos nucleicos diversos, cada uno de los cuales organiza su corta, pero útil cadena de reacción, utilizando ATP formado por luz ultravioleta solar y no a costa de organismos, veremos que vamos encaminados hacia el desarrollo de la complejidad biológica. Si, por casualidad, llegaran a unirse dos ácidos nucleicos emplazados uno cerca del otro, la interacción que sufrieran podría ser ventajosa para ambos. Se conocen varios métodos por los cuales puede hacerse tal asociación física. La figura 17-3 muestra unos cuantos "coacervados". En experimentos que posiblemente simulaban las condiciones de los primeros océanos, el químico holandés H. G. Bungenburg de Jong, encontró en la década de 1930, que con

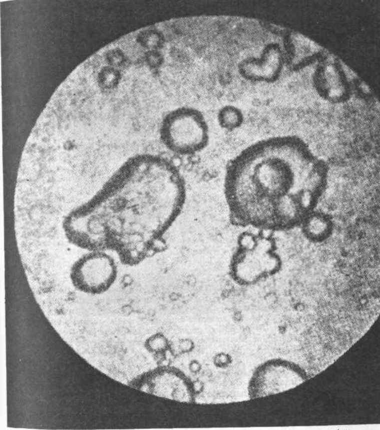


Figura 17-3. Ejemplos de sistemas coacervados con tres componentes: gelatina, goma arábiga y RNA. (Tomada de una publicación del Profesor A. I. Oparin.)

frecuencia existe síntesis espontánea de objetos en el intervalo de tamaños entre 1 y 100 μ que son ricos en su interior en materia orgánica coloidal y que están claramente separados por fuera del medio ambiente externo. En algunos de sus experimentos se concentraron ácidos nucleicos en el interior del coacervado. ≫

A. I. Oparin cree que esas gotículas de coacervado fueron, en esencia, las primeras formas de vida en la Tierra. Son muchas las propiedades interesantes que tienen; en particular, pueden absorber en su estructura varias moléculas orgánicas sencillas del medio que las rodea. Oparin cree también que ésta es una forma elemental de metabolismo, una propiedad de la vida de la máxima importancia. Afirma asimismo que el coacervado pasa por un proceso análogo a la selección natural, que describe del modo siguiente:

> Las gotitas de coarcervado que se formaron en las aguas de la Tierra se hallaban inmersas en una disolución que contenía varias materias orgánicas y sales inorgánicas. Estas sustancias fueron absorbidas por la gotita y tomaron parte con ella en las interacciones químicas, es decir, se produjo la síntesis orgánica. Pero paralelamente estaba el proceso de la descomposición. La velocidad de cada uno de estos procesos, y de los otros, dependía de la organización interna de las distintas gotitas de coacervado. Durante un período de tiempo relativamente largo, sólo pudieron sobrevivir aquellas gotitas que poseían suficiente estabilidad dinámica para que su velocidad de síntesis excediera a la de descomposición; las del caso contrario desaparecieron; no desempeñaron –por su "mala" organización– ningún papel en el posterior desarrollo de la materia viviente.

Nos resulta difícil compartir con Oparin que esas gotículas de coacervado fueran las primeras formas de vida en la Tierra. Aun cuando es interesante la analogía entre el intercambio de materia y el metabolismo, no demuestra claramente que los coacervados fueran organismos vivos primitivos. Una propiedad fundamental de los sistemas biológicos es la autorreplicación, incluyendo la presencia de un código genético que transfiere las propiedades de generación a generación. Los coacervados no tienen mecanismo heredado. La hipótesis de Oparin no explica la transición de los sistemas no biológicos a los vivos.

≪ Las microesferas de Sidney W. Fox (figura 17-4) son, posiblemente, un modelo más interesante de los enclaves moleculares precelulares. Las microesferas se forman calentando y enfriando polipéptidos sintéticos. Las microesferas son bastante menos complejas que las células bacterianas que están estructuradas con grandiosidad, (figura 14-1), a las que se parecen superficialmente. Sin embargo, las microesferas tienen considerablemente más estabilidad que los coacervados. Dan lugar pues, a creer que fueron comunes los enclaves locales de materia orgánica en los océanos primitivos. No sabemos detalladamente como pudo haber evolucionado tal enclave hasta la célula contemporánea, con su elaborada coreografía reproductiva. Una

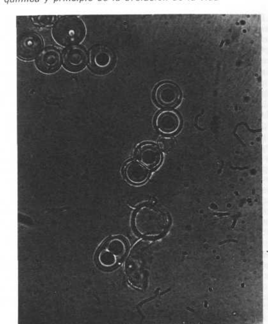


Figura 17-4. Ejemplos de microesferas de polipéptidos sintéticos obtenidos por el Profesor S. W. Fox y el Dr. S. Yuyama, de la Universidad de Miami. El aspecto gemelo de algunas de estas microesferas recuerda al de células en el proceso de división; sin embargo, las microesferas no tienden siempre espontáneamente a la división. Estas formas gemelas se produjeron generalmente comprimiendo microesferas sencillas con un cristal de porta. (Cortesía del Profesor Fox.)

posibilidad prometedora es que los organismos sencillos de vida independiente, se congregaron en disposición cooperante suelta, que lentamente evolucionara luego a un todo de interacción perfecto. Recientemente se ha hallado que tales orgánulos citoplásmicos, como los cloroplastos (que regulan la fotosíntesis), las mitocondrias (que regulan la respiración) y los pequeños cuerpos en la base de los flagelados (véase el capítulo 14), todos ellos tienen

su propio DNA, distinto al del núcleo de la célula, que sugiere sus orígenes independientes. La evolución de la célula requiere claramente un largo período de selección natural. Pero, como hemos visto en el capítulo 16, las pruebas geológicas y paleontológicas suponen un intervalo del orden de los mil millones de años entre el origen de la vida y el de las primeras células.

≪ Una propiedad característica de las moléculas que intervienen en los sistemas biológicos es que tienden a ser asimétricas. ¿Qué significa la asimetría molecular? Supongamos que fabricáramos guantes y que tenemos piezas para la palma, para el dorso, el pulgar y los otros cuatro dedos. Hay dos maneras de unir todas estas piezas. Podemos hacer guantes para la mano derecha o para la izquiera. El que las dos clases no son iguales, resulta evidente si nos ponemos el de una mano en la otra. Igualmente, las moléculas orgánicas que ocupan tres dimensiones, están formadas de diversas formas asimétricas y no equivalentes. La asimetría molecular se puede detectar por rotación óptica. Si un haz de luz polarizada plana pasa a través de una disolución que contiene una molécula asimétrica, girará el plano de polarización. Si lo gira hacia la derecha, se dice que la molécula tiene asimetría de mano derecha o que es "dextrógira" (abreviadamente D); si lo gira hacia la izquierda, se dice que tiene asimetría de mano izquierda o que es "levógira" (abreviadamente L). En cualquiera de ambos casos decimos que la molécula es "activa" ópticamente. La actividad óptica es pues función de la asimetría molecular. Si las moléculas de la disolución son simétricas o si hay igual número de moléculas dextrógiras que levógiras, no se puede producir ninguna rotación óptica. Un par de moléculas compuestas exactamente por los mismos átomos, pero de simetrías opuestas, como el guante derecho y el izquierdo, se conocen como "estereoisómeras"; una mezcla de números iguales de estereoisómeros levógiros y dextrógiros se denomina mezcla "racémica".

≪ En 1848, Louis Pasteur investigó la diferencia entre el ácido tártarico —molécula dextrógira— y el ácido racémico —molécula que aparentemente tiene la misma estructura que el ácido tartárico, que tiene los mismos átomos situados todos del mismo modo y que, en cambio, no es activo ópticamente. En una serie de brillantes experimentos, Pasteur encontró que el ácido racémico era una mezcla de ácido tartárico dextrógiro y de otro tartárico levógiro, hasta entonces desconocido, que giraba el plano de polarización hacia la izquierda. Pasteur separó con ayuda del microscopio los cristales levógiros y los dextrógiros del ácido racémico y pudo demostrar que las dos partes giraban los planos de polarización en sentidos opuestos.

≪ Podríamos suponer que las moléculas empleadas en los sistemas biológicos son racémicas; que hay tantos isómeros dextrógiros como levógiros, pero este no es el caso. Las moléculas de los sistemas vivos son peculiarmente de actividad óptica. En su forma natural, sólo hallamos la forma D de la glucosa. Las paredes celulares de las bacterias contienen únicamente el isómero D de los aminoácidos y las enzimas de su interior están compuestas solamente de aminoácidos L. ¿Por qué es la actividad óptica una propiedad común de las moléculas biológicas? Las enzimas desempeñan una función muy específica en el metabolismo intermedio; catalizan sólo un conjunto de reactivos y no a los demás. En realidad, acostumbran a distinguir entre dos estereoisómeros, metabolizando, por ejemplo, el ácido tartárico D y no el L. Esto ha llevado a pensar que las enzimas son activas por formar una estructura tridimensional con los reactivos a modo de cerradura y llave, que pone en contacto los reactivos y entonces va a la búsqueda de más reactivos. En los últimos años han aparecido pruebas de peso en favor de este modelo ce cerradura y llave de actividad enzimática.

≪ Para que un organismo tenga enzimas que hagan se efectúe un conjunto de reacciones y no las demás, ha de haber una gran precisión de selectividad estérea, es decir, la enzima, de alguna forma, tiene que poder distinguir entre las varias configuraciones tridimensionales de moléculas similares. El bioquímico americano Lubert Stryor, de la Universidad Stanford, ha puesto de manifiesto que esa selectividad estérea para la acción enzimática, exigirá con el tiempo que se haga distinción entre los estereoisómeros. Creemos que una bioquímica sin estereoisomerísmos es a lo más, primitiva. Así, la búsqueda de actividad óptica será un dato importante para cualquier exploración de vida extraterrestre. Por ejemplo, si en Marte encontramos mezclas racémicas de compuestos orgánicos, nos podrá llevar a la conclusión de que no ha llegado muy lejos la evolución biológica, pero si encontramos actividad óptica, la cosa será mucho más interesante, sobre todo si además hallamos estereoisómeros distintos a los que tenemos aquí.

≪ ¿Pero, cómo surge la actividad óptica? En los experimentos realizados por Miller, Urey y sus sucesores, las moléculas orgánicas sintetizadas forman una mezcla racémica. ¿Hay algunos mecanismos para la generación no biológica de moléculas asimétricas? Se sabe que las reacciones fotoquímicas en las que interviene la luz polarizada pueden dar productos activos ópticamente derivados de sus precursores racémicos, o que un catalizador que es activo ópticamente, como el cristal de cuarzo por ejemplo, puede dar productos de actividad óptica o, finalmente, que puede haber una reacción espontánea en ausencia de factores de actividad óptica que, no obstante, dé un producto activo ópticamente. Pero ninguno de estos mecanismos puede explicar el origen en bioquímica de la actividad óptica; porque, en general ambos estereoisómeros de un par de ellos se producen en cantidades iguales. La cantidad de luz polarizada de mano izquierda que incide en la superficie de la Tierra está compuesta por la polarizada de mano derecha; la cantidad de cuarzo asimétrico izquierdo, es igual a la de cuarzo asimétrico derecho y la amplitud de la síntesis espontánea de compuestos levógiros tiene que estar exactamente compensada por la tasa de síntesis de compuestos dextrógiros. Parece muy probable que las moléculas orgánicas sintetizadas en la Tierra primitiva en la época del origen de la vida no eran, en promedio, de actividad óptica.

≪ Es concebible que la actividad óptica en bioquímica sea el resultado de la selección natural. Cuando los sistemas enzimáticos y las cadenas de

reacción bioquímica se desarrollaron, tuvo que perfeccionarse la especificidad tridimensional de la disposición de cerradura y llave de las enzimas y reactivos. Después de un tiempo, las enzimas tuvieron que poder distinguir los isómeros levógiros de los dextrógiros. Imaginémonos dos organismos, uno que sintetiza aminoácidos L y otro que sintetiza aminoácidos D, ambos procedentes de precursores más sencillos. Supongamos ahora, que por una razón totalmente desligada del estereoisomerismo de los aminoácidos, el sintetizador del L se adaptara un poco mejor a su ambiente que el sintetizador del D. Transcurridas unas cuantas generaciones, los primeros dominarían el campo biológico y, más tarde, acabarían por extinguirse los sintetizadores del aminoácido D. Los descendientes de este organismo seguirían sintetizando aminoácidos L y no porque éstos tengan algún mérito propio sobre los D, sino porque se habrían entramado en la tela de la vida. Si la prevalencia de aminoácidos L en los sistemas enzimáticos contemporáneos es consecuencia de un accidente histórico de esta clase, la probabilidad de encontrar aminoácidos D en enzimas extraterrestres sería de 1 a 2 y si, por otra parte, las investigaciones sobre forma de vida extraterrestre indican que, además, predominan los aminoácidos L por todas partes, nos veremos obligados a revisar nuestras creencias sobre la razón de la actividad óptica.

⪡ En este capítulo hemos tratado algunos problemas químicos del origen de la vida. Mucho de cuanto hemos dicho es puramente especulativo, por la sencilla razón de que ninguno de nosotros estaba en la Tierra cuando apareció la vida. De momento, lo mejor que podemos hacer, es inventar una especie de historieta y maximizar su plausibilidad por investigación de laboratorio, aunque sólo aplicándola a los sistemas vivos será como podremos comprobarla con rigor. ¿Existen formas extraterrestres compuestas principalmente de carbono, hidrógeno, nitrógeno, oxígeno, fósforo y azufre? ¿Cómo se reproducen? ¿Está el material genético compuesto de ácidos nucleicos? ¿Son las proteínas sus catalizadores moleculares? ¿Están éstas dispuestas en las células? ¿Son sus moléculas dextrógiras o levógiras? ¿O racémicas? Nos hallamos ante el umbral de estos descubrimientos.

⪡ La posterior evolución de la vida por selección natural en réplica a los retos del medio ambiente está cada vez más documentada por la información que nos dan los fósiles. Hay una tendencia general, a medida que avanza el tiempo, hacia la mejora de la complejidad. Y con todo, no hay razón para sospechar ninguna urgencia o deseo hacia la complejidad por los organismos en evolución. Hemos visto que prosperaron aquellos mutantes del ambiente primitivo que llevaron a la mejor supervivencia y replicación de los ácidos nucleicos; los demás sistemas moleculares perecieron en gran número. Existe, por lo tanto, un sentido en el cual la evolución de la célula y toda la evolución posterior hasta el hombre, puede considerarse como un dispositivo para que continúe la supervivencia de los ácidos nucleicos. Hay un sentido en el cual nuestros instintos y deseos, nuestros amores y odios, nuestra respiración, alimentación, sueño y muerte existen porque nos ayudan

a la existencia continuada de las moléculas de nuestro material genético; un sentido en el que somos reponedores ambulantes fundamentales de nuestros ácidos nucleicos. Tanto si esto nos gusta como si no nos gusta, es, al menos en parte, por lo que existen los seres humanos; si somos algo más es por nuestra inteligencia, pero cuánto somos, es una cuestión discutible. ⪢

18

¿Hay vida en la Tierra?

Llegamos ahora al único planeta en que se sabe con certeza que existe el hombre y que ha de tener para nosotros un interés superior sobre cualquiera de los que hemos visto, puesto que es el nuestro. Se ha dicho que viajamos en él por el espacio como los pasajeros en un barco y la mayoría de nosotros nunca hemos pensado en ninguna parte del barco si no es en el rancho que nos toca. Algunos curiosos (los geógrafos) han visitado la caseta del timón y otros (los geólogos) han buscado por las bodegas, pero, con todo, sigue siendo cierto que los que están en una parte del barco, poco saben, incluso ahora, de sus compañeros de viaje en otra parte. ¡Cuánto menos debemos saber la mayoría de nosotros del barco en sí, en el que todos hemos nacido y frente al que nunca hemos estado contemplándolo desde fuera!

Samuel Pierpont Langley, *The New Astronomy* (1891)

≪ El origen de la vida parece ser un atributo incidental al desarrollo primitivo de una superficie planetaria. Hemos visto que sólo condiciones muy generales –una atmósfera reductora de, aproximadamente, abundancia cósmica y masas de agua líquida– son las que se necesitan para la producción en gran escala de moléculas orgánicas complejas. A juzgar por la historia de la Tierra, si tales condiciones prevalecen tan sólo durante unos cuantos cientos de millones de años, parece probable el origen de la vida. Por todo cuanto sabemos, son adecuados períodos de tiempo mucho más cortos. ≫

Se cree que en los primeros tiempos de la formación de nuestro sistema solar, eran semejantes muchas de las condiciones físicas y químicas en los planetas terrestres (Mercurio, Venus, Tierra y Marte). Estos planetas, se supone, están formados todos a partir de la misma nebulosa de gas solar y polvo y sus composiciones químicas primitivas fueron casi idénticas. Así pues, cabe aceptar que las condiciones que trajeron el origen de la vida a la Tierra estuvieron también presentes en los demás planetas terrestres.

≪ Sin embargo, hay otros factores a considerar además del medio ambiente inicial. Si las temperaturas superficiales fueran demasiado altas, las moléculas orgánicas corrientes se disociarían térmicamente a la misma velocidad que se formaran y no habría medio líquido que hiciera de disolvente para las primeras interacciones químicas y de pantalla contra la radiación ultravioleta de aquel entonces. Si las temperaturas superficiales fueran demasiado bajas, las reacciones químicas corrientes tendrían lugar a velocidades insignificantes y todo medio líquido se congelaría y, por ende, resultaría inadecuado. El punto de congelación del agua puede bajarse agregando sales a la disolución, con lo cual, el intervalo razonable para el agua líquida como medio para los sistemas biológicos y para una buena estabilidad y velocidad de reacción de los productos químicos orgánicos corrientes va de $-50°C$ a $+100°C$. Como las temperaturas del hemisferio iluminado de Mercurio (1), por ejemplo, son muy superiores a las citadas, son razón para excluir provisionalmente la vida en ese planeta.

≪ Otro factor es la temperatura de la exosfera, altura, a partir de la cual se escapan las moléculas al espacio. Si es muy elevada, el ritmo de escape de una atmósfera planetaria sería muy alto; su atmósfera reductora estaría retenida un período de tiempo muy corto y éste no resultaría apropiado para el origen de la vida. Hemos tratado ya de esta cuestión en el capítulo 15 con

1.– N. del T. Mercurio presenta siempre "casi" la misma cara al Sol.

ocasión del desarrollo por panspermia en posibles planetas de otras estrellas. Mercurio, de nuevo, tiene una masa tan poco densa y una temperatura tan alta en la exosfera, que cualquier atmósfera reductora primitiva que pudiera haber tenido alguna vez se habría esparcido por el espacio casi desde su nacimiento. En medios con temperaturas bajas pueden ser posibles bioquímicas más exóticas. El amoníaco líquido o las disoluciones de hidrocarburos pueden substituir al agua como sistema disolvente y los compuestos de silicio pueden substituir a los de carbono como bioquímicos estructurales.

≪ Nuestro saber de los medios ambientales planetarios nos permite excluir provisionalmente a Mercurio y a la superficie de la Luna como posibles moradas para la vida; probablemente, también a Venus, los asteroides y la mayoría de las demás lunas del sistema solar. Pero hemos de ir con mucha cautela al aplicar a priori estos juicios negativos para no dejarnos llevar por la analogía terrestre. Dicho de otro modo: puede haber químicas y sistemas biológicos que ni siquiera imaginamos. La mejor solución es la observación y no la deducción.

≪ ¿Sería fácil detectar los sistemas biológicos de la Tierra desde una plataforma de observación remota? La masa de la Tierra es de 6×10^{27} g, la de la atmósfera, de 5×10^{21}. No obstante, la masa de la materia biológica sobre la superficie de la Tierra es solamente de unas pocas veces 10^{17} g según los mejores cálculos recientes; menos que el 0,0001 por ciento de la masa del *aire* y como el 10^{-8} por ciento de la masa de la Tierra. Así, con toda la importancia que nos damos, no somos más que una especie de moho biológico pegado a la superficie de nuestro pequeño planeta y que pesamos mucho menos que el aire invisible que nos envuelve. Y con todo, hemos domado y revuelto la superficie de nuestro planeta, alterado su personalidad y estamos en el proceso de apartarnos de él a grandes distancias. ¿Son nuestras actividades, tan evidentes para nosotros, apreciables desde un punto distante propicio? ¿Se detectaría nuestra presencia? ≫

Para apreciar la situación en que se encuentra el astrónomo absorto en la Tierra, imaginemos que somos astrónomos marcianos en un observatorio marciano. Contamos en nuestro equipo con los más modernos instrumentos de uso corriente en la Tierra. Desde nuestro espléndidamente equipado observatorio planteémonos la siguiente cuestión. ¿Existe vida en la Tierra?

El planeta Tierra, visto en el cielo de Marte, aparecería como una estrella muy brillante, sólo un poco menos a como aparece Venus desde la Tierra. Igual que nosotros vemos como Venus pasa por fases, como la Luna, el hipotético astrónomo marciano observaría las fases de la Tierra. ≪ Puesto que aparecería en el cielo de Marte a mayor distancia angular del Sol que Venus respecto a nosotros, sería más fácil observarnos a nosotros desde Marte, que Venus desde la Tierra. Apareceríamos como una "estrella" matutina o vespertina a poca altura en el cielo de Marte. A consecuencia de las fases, sería imposible observar un lugar de la Tierra cerca del mediodía, de tiempo local, excepto cuando se encontrara a gran distancia de Marte, al otro lado del Sol. ≫

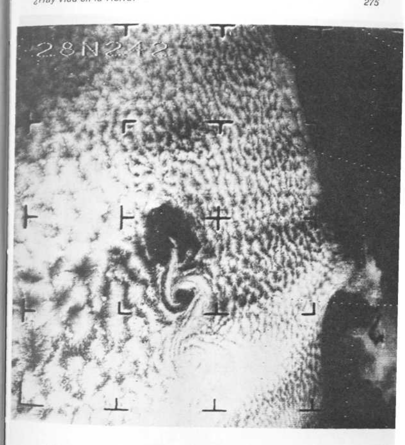


Figura 18-1. Fotografía del Nimbus 1 de un modelo de remolino nubular sobre Guadalupe y Baja California, el 14 de septiembre de 1964. (Cortesía del Goddard Space Flight Center, NASA.)

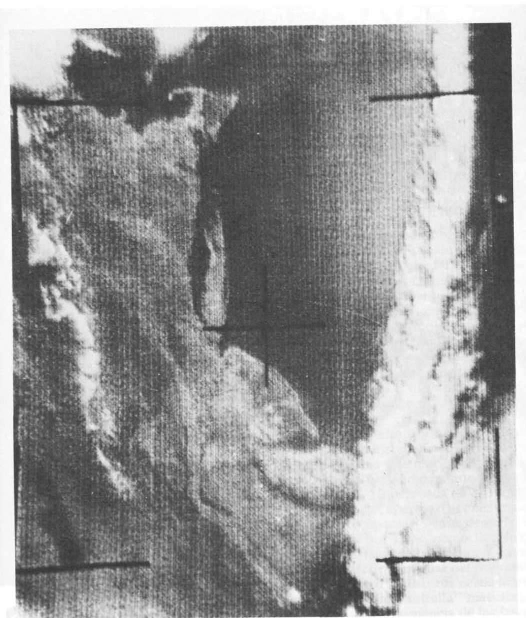


Figura 18-2. Fotografía del Tiros 7 de la costa oriental de los Estados Unidos, el 23 de junio de 1963. (Cortesía del Goddard Space Flight Center, NASA.)

Figura 18-3. Fotografía del Tiros 5 del sur de la India y Ceilán, el 6 de marzo de 1963. (Cortesía del Goddard Space Flight Center, NASA.)

¿Podrían verse desde el observatorio marciano las obras de ingeniería de los hombres? Presas, embalses, ciudades... ¿se detectarían? ≪Debido a la turbulencia de la atmósfera de la Tierra, incluso el mayor de nuestros telescopios, el reflector Hale de 200 pulgadas de Monte Palomar California, no es capaz de fotografiar ningún detalle en Marte menor que unos 300 km. La atmósfera marciana es mucho más transparente que la terrestre y es posible que por ello la resolución para un observatorio en Marte sea mayor. La menor característica de la Tierra visible desde Marte podría ser solamente de kilómetros.

≪ La Tierra se ha retratado ya muchas veces desde el espacio. Los Estados Unidos han emprendido un programa de fotografías sistemático por satélites de las series Tiros y Nimbus, para cartografiar la formación, movimiento y disipación de nubes con el fin de mejorar la predicción del tiempo. Aunque las cámaras fotográficas instaladas en esos satélites no están ideadas para detectar vida, las podemos usar para ese fin. Las fotografías de la Tierra tomadas desde los satélites Tiros y Nimbus muestran a veces, capas de nubes tan ejemplares y provocativas como la de la figura 18-1. Cuando hay claros en las nubes se pueden tomar vistas de la superficie de la Tierra como las de las figuras 18-2 y 18-3. En la primera de estas se ve la costa este de los Estados Unidos desde la bahía de Chesapeake a cabo Cod. En la 18-3. la punta sur de la India y la isla de Ceilán. Las regiones que aparecen en estas fotografías se cuentan entre las más pobladas y de vegetación más densa de la Tierra y ni siquiera inspeccionándolas con atención se descubre ninguna señal de vida. Nueva York aparece desierto; la India y Ceilán como zonas áridas. Estas conclusiones se han repetido cientos de veces en el estudio minucioso de las fotografías de Tiros de las regiones pobladas de la Tierra: cuando la resolución no es mejor que unos pocos kilómetros, no hay señal de vida en la Tierra.

≪ Entre todas, se habrán examinado unos cuantos cientos de miles de fotografías tomadas por la serie Tiros. En algunas de ellas se pueden apreciar hasta objetos de unos 600 metros, pero sólo en una —en la de la figura 18-4— aparece algún signo claro de vida en la Tierra. Corresponde a una fotografía tomada por el Tiros 2 de un bosque cerca de la ciudad maderera canadiense de Cochrane, Ontario, el 4 de abril de 1961. En la parte superior izquierda pueden verse varias franjas anchas paralelas y otras a ángulo recto con estas. Los taladores del Canadá han abierto en el bosque unas ringleras de kilómetro y medio de anchas, separadas unas de otras unos cinco kilómetros. La nieve caída y que cubre las ringleras hace mayor el contraste entre las zonas con árboles y las taladas. E incluso en este caso, en esta fotografía entre un millón ¿tenemos en realidad signos inequívocos de vida desde el punto de observación en Marte? ¿No pueden imaginar los marcianos que tal configuración puede ser consecuencia de un proceso geológico? Incluso en esta fotografía con mejores resoluciones a las que cabe esperar puedan tener en Marte, no hay prueba rigurosa de vida en la Tierra.

≪ Mis colegas y yo hemos hecho un estudio de las fotografías con mayor resolución disponibles del satélite Nimbus y, con resoluciones de unas cuantas



Figura 18-4. Fotografía del Tiros 2 de la región de Cochrane, Ontario, Canadá, tomada el 4 de abril de 1961. (Cortesía del Goddard Space Flight Center, NASA.)

decenas de kilómetros, hemos descubierto una autopista recién terminada en Tennessee, quizá la estela de un avión a reacción en el estrecho de Davis, la de un barco en el mar Rojo, así como una característica indudable en la costa norte de Marruecos que tenía todos los signos claros de proyecto racional, pero que en realidad era una península. Con una resolución de centenares de metros se pueden detectar los signos de vida racional en la Tierra, pero no sin ambigüedades. La evidencia fotográfica convincente de vida racional en la Tierra precisa una resolución de 10 metros o mayor aún. ≫

¿Podría detectarse la iluminación nocturna de las grandes ciudades, como Nueva York, Moscú, Tokio, París, Londres, Chicago? Imaginemos que la iluminación artificial de una de las mayores ciudades, sea en promedio diez veces mayor que la que recibe de la luna llena y que está confinada a una región de 10 km cuadrados. Existe entonces la posibilidad remota de que el astrónomo marciano que observara el hemisferio no iluminado de la Tierra pudiera ver una débil mácula de luz, del orden de la 16ª magnitud. Sin embargo, en realidad, debido a la dispersión de la luz solar procedente del hemisferio iluminado de la Tierra, el astrónomo marciano, en el mejor de los casos, podría detectar marginalmente una débil señal. ≪ Otro factor que tiende a hacer sean invisibles desde fuera nuestras mayores ciudades es la contaminación de su atmósfera. Parece ser que cualquier ciudad lo suficientemente grande para que su alumbrado nocturno pudiera observarse desde Marte, emite tal cantidad de vapores y humos industriales, incluso por la noche, que resulta imposible verla. El astronauta americano M. Scott Carpenter pudo distinguir senderos de montaña y humos de chimeneas cuando estaba sobre el Tibet: en cambio, cuando su órbita pasó por el sur de California, no pudo hallar rasgo de la ciudad de Los Angeles. ≫

Las explosiones nucleares que por desgracia tienen lugar de vez en cuando en el planeta Tierra, podrían verse desde Marte como destellos muy brillantes de corta duración. No obstante, como las pruebas de armas nucleares sólo ocurren contadas veces y dado que el destello resultante es visible sólo un instante, lo más probable es que tales explosiones no se pudieran detectar desde Marte. Si se iniciara un programa especial para las observaciones sinópticas de la Tierra, quizá pudieran observarse con certeza las explosiones nucleares. Sin embargo, no parece probable que el astrónomo marciano civilizado pudiera deducir de esos destellos de luz de tan poca duración que existiera vida en la Tierra, aun prescindiendo si era, o no, racional. Ni siquiera nosotros que vivimos aquí, podemos apenas creer que esos bárbaros experimentos que pueden llevar a la destrucción de la vida de este maravilloso mundo, sean manifestaciones racionales.

Con un telescopio óptico, un astrónomo en Marte podría detectar variaciones de color estacionales sobre una vasta zona de la superficie terrestre. ≪ Los cambios principales de color estacionales y de brillo, tienen lugar en bosques de árboles caducifolios y en las regiones plantadas de mieses, como Ucrania y el medio oeste americano. ≫ A la vista de esas observaciones se podrían imaginar muchas explicaciones. ≪ Quizá en la Tierra, en algunas regiones,

hay cristales cuyo color depende de la temperatura, o cuya profundidad depende de la humedad. O quizá se deban a cierta forma de vida en la Tierra. ≫ Pero no parece probable que el astrónomo marciano llegara *verdaderamente* a la conclusión de que las variaciones de color estacionales eran de origen biológico.

Si la Tierra se observara regularmente durante un período de varios decenios, se podrían apreciar las transformaciones principales de su superficie, como por ejemplo, la destrucción sistemática de los bosques. ¿Y podría el astrónomo marciano sacar conclusiones determinantes de esas observaciones? ≪ Semejantes variaciones "seculares" sistemáticas y principales se pueden observar en la superficie de Marte, como veremos en el capítulo 20. En sí mismas, tales variaciones son muy interesantes, pero, en verdad, no pueden considerarse como prueba irrefutable de la presencia de vida. Muchas de esas variaciones (aunque a menor escala) se han visto en la Luna y, en cambio, es casi seguro que en su superficie no hay vida.

≪ Desde el observatorio marciano se podrían hacer intensas mediciones espectroscópicas de la Tierra. En la búsqueda de vida, se podrían ver las franjas espectrales en el infrarrojo, que se deben a absorción por materia orgánica superficial. Pero, por desgracia, esas franjas, con longitudes de onda de 3,5 μ y más largas, para verlas con los instrumentos existentes, tienen que observarse con luz reflejada. La luz transmitida desde la Tierra a Marte a longitudes de onda superiores a los 3,5 μ es en su mayoría energía infrarroja radiada por la Tierra y no luz solar reflejada por ella. Le resultaría difícil al astrónomo marciano detectar señales espectroscópicas de materia orgánica superficial.

Podrían reconocerse algunos de los componentes atmosféricos menores, que son de origen biológico, tales como el CH_4 y el N_2O.

El metano es un gas muy reducido y tiene que producirse continuamente en la atmósfera terrestre, para que su total no se agote por oxidación. El metano de la atmósfera terrestre está producido principalmente por bacterias que convierten los compuestos orgánicos en CO_2 y CH_4 ; viven en el fango del fondo de las charcas, donde se acumula mucha materia orgánica, y las condiciones son anaerobias. Por esta razón, el CH_4 recibe también el nombre de "gas de los pantanos". Otras bacterias del metano viven en la panza de las vacas y de otros ungulados. En consecuencia, una de las fuentes principales de metano de la atmósfera terrestre es la flatulencia de las vacas. El reconocimiento de ese metano desde el observatorio marciano resultaría muy significativo sólo en el caso de que sus astrónomos supieran interpretarlo. Pero no parece probable que llegaran a lograrlo.

≪ ¿Y respecto al metano en las atmósferas de los planetas joviales? El astrónomo soviético G. A. Tikhov postuló que el metano de Júpiter procede de la misma fuente que el terrestre, llegando a la conclusión que por lo menos tiene que haber, si no vacas, bacterias joviales. Como ya hemos visto (capítulos 4 y 16) que el metano es un constituyente primordial de las atmósferas planetarias, no debemos tener mucho en cuenta esta hipótesis. Sin embargo,

pone de relieve las dificultades para relacionar la presencia de una molécula sencilla con la actividad biológica. ≫

Casi todo el oxígeno libre de la atmósfera terrestre es producto de la fotosíntesis de las plantas. La fuente principal de oxígeno no está constituida por las plantas superiores, sino por el plancton marino que puebla los océanos. ≪ La corteza de la Tierra está suboxidada, es decir, admite la ulterior reacción química con el oxígeno atmosférico. ≫ Si no fuera por la producción continua de oxígeno de la actividad biológica, desaparecería de la atmósfera en el transcurso de unos pocos años. Si la cantidad de oxígeno libre en una atmósfera planetaria es tan pequeña que sólo puede detectarse en los mismos límites de la sensibilidad instrumental, se podría entonces explicar su presencia por hipótesis no biológicas. Pero una cantidad tan grande de oxígeno como la que está presente en la atmósfera de la Tierra sólo se puede explicar en función de una extensa actividad biológica. ≪ Y a pesar de ello, podemos hacer a esto dos objeciones. Es concebible que una atmósfera con mucho oxígeno estuviera producida por fotodisociación del agua. (Véase el capítulo 16.) Además, me pregunto si un organismo anaerobio inteligente que sabe que el oxígeno es un gas venenoso, podría ver fácilmente que una atmósfera rica en oxígeno sólo puede ser el producto de la actividad biológica. ≫

≪ Si los astrónomos marcianos tuvieran un instrumento muy sensible que les permitiera el examen del espectro visible de la Tierra a una longitud de onda luminosa, habrían observado un mayor aumento aparente en la abundancia de gases como neón, argón, mercurio y sodio en el espectro del cielo nocturno de la Tierra, a lo largo de los últimos decenios. El que hubieran atribuido ese cambio a error instrumental, a mejoras en los ingenios de alumbrado terrestre o a una catástrofe inminente, es cuestión de controversia.

≪ Las mediciones espectroscópicas sistemáticas de la Tierra revelarían que las cantidades de oxígeno y agua en la misma son enormes, sobre todo, en comparación con Marte. Nuestras temperaturas parecerían sumamente incómodas y apreciarían la ausencia de luz ultravioleta procedente de la superficie. Es muy posible, que los científicos marcianos, razonando en base marciana, llegaran a la conclusión de que sin pruebas evidentes de vida en la Tierra y con tal acúmulo de inconvenientes ambientales, debía prescindirse de ulteriores búsquedas de la misma en la Tierra. ≫

No obstante hay otro método que podría emplearse para detectar vida en la Tierra. Imaginemos que existen laboratorios marcianos dotados de un radiotelescopio moderno — instrumento que nos permite detectar, medir y registrar la emisión de radioondas procedentes de distintos objetos celestes. El astrónomo marciano, como su colega terrestre, investigaría las emisiones de radioondas de los planetas. ≪ Averiguaría que Venus es una radiofuente, probablemente porque su superficie está caliente; que Júpiter es una radiofuente porque los electrones de su campo magnético emiten radiación sincrotrón, y así sucesivamente. ≫ Sin embargo, al dirigir el radiotelescopio hacia la Tierra, haría un descubrimiento asombroso: a longitudes de onda de metros, el planeta Tierra, que no se suponía, emite radioondas casi con la misma potencia que el Sol en los períodos de poca actividad de sus manchas. ≪ ¡Un planeta tan brillante como una estrella! ≫ En la banda de metros de longitud, la Tierra radia un millón de veces más que Venus o Mercurio. Este descubrimiento podría hacerse en Marte con un sencillo radiotelescopio.

Continuando la investigación verían que las diferentes regiones de la superficie de nuestro planeta radian por desigual; hallarían una relación periódica entre la intensidad de emisión de radio y la rotación de la Tierra sobre su eje. Por ejemplo, que cuando Africa o Asia Central y Meridional estuvieran frente a Marte, descendería bruscamente la intensidad de emisión radio y que cuando fueran Europa y Norteamérica las que estuvieran frente a Marte, la potencia emitida aumentaría bruscamente. Si las observaciones se llevaran a cabo largo tiempo, el astrónomo marciano haría aún un descubrimiento más sorprendente: la Tierra emite hoy radioondas con 10^6 veces más intensidad que hace unos pocos decenios. ≪ Quizá los astrónomos marcianos trataran de buscar una explicación "natural" a este fenómeno y, con el tiempo, todas ellas resultarían fallidas. ≫ Los astrónomos marcianos sabios llegarían a percatarse que la radioemisión no podía explicarse por efecto de fuerzas naturales, sino sólo por medios artificiales y llegarían a la conclusión de que en la Tierra existe vida racional, descubrimiento notable en verdad.

En la Tierra hay miles de estaciones transmisoras de televisión. Si consideramos la potencia media de cada estación (aproximadamente 20 kilowatts), el ancho de banda de frecuencia a que transmiten, el período medio de programación de cada estación (por ejemplo 18 horas) y el hecho que todas las longitudes de onda en la transmisión de televisión (1,5 - 6,0 metros) atraviesan sin obstáculo la atmósfera de la Tierra y la de Marte, podemos calcular la potencia transmitida desde la Tierra a Marte.

Los radioastrónomos pueden estar interesados en saber que la denominada "temperatura de brillo" de la Tierra a longitudes de onda de televisión es de unos cientos de millones de grados; cien veces mayor que la de radioondas del Sol a longitudes de onda comparables, durante un período de poca actividad de las manchas solares. Además de las estaciones transmisoras de televisión, hay gran número de emisoras de radio y otras instalaciones que emiten radioondas intensamente en el margen de longitud de onda de ultra alta frecuencia. ≪ El Ballistic Missile Early Warning System (BMEWS) (2) de los Estados Unidos, hace unos años detectaba de vez en cuando la Luna en las pantallas de sus radars.

≪ Hemos ofrecido esta fantasía del observatorio marciano que investiga la Tierra, porque da idea de las dificultades reales y de los posibles éxitos de las investigaciones a distancia sobre biología planetaria. Si, excepto a radiofrecuencias, los hipotéticos marcianos no podían encontrar ninguna señal de vida en la Tierra, no nos ha de sorprender que todavía no se haya llegado con

2.– N. del T. Sistema de aviso anticipado de misiles balísticos.

rigor indiscutible e inequívoco a pruebas de vida en Marte. Se han efectuado las investigaciones sobre transmisión radio desde Marte y los resultados han sido totalmente negativos. La emisión radio de Marte es el ruido desordenado de la emisión térmica. ≫

En el ejemplo de la radioemisión de la Tierra, hemos encontrado, por primera vez, las implicaciones cósmicas de la actividad biológica de los seres racionales. Debido a la presencia de civilizaciones técnicas en nuestro planeta, se ha producido la modificación drástica de una característica importante de la Tierra, tal como se ve desde fuera: la naturaleza y potencia de su radioemisión. ≪ El trabajo arduo de un astrónomo extraterrestre podría llegar a convencerle que las señales tienen un contenido inteligible (a pesar de la calidad de muchos programas de televisión). ≫ La Tierra se ha diferenciado notablemente de los demás planetas de nuestro sistema solar. Un atributo esencial de la vida racional es que, más pronto o más tarde, su actividad alcanzará naturaleza cósmica. En la Parte III del libro estudiaremos esta posibilidad.

¿Implica en sí la ausencia de radioemisión fuerte, no térmica e inteligible de Marte, que no hay en él formas de vida muy evolucionadas? En términos generales, no. Gran parte de la radioemisión correspondiente a la transmisión de televisión se pierde en el espacio; quizá la radioemisión de Marte no es lo suficientemente potente para llegar a la Tierra. Es lógico suponer que cuando las civilizaciones técnicas avancen más, idearán métodos para aprovechar la energía electromagnética con menos pérdidas. Es probable que las ondas electromagnéticas se enfoquen en haces discretos, densos, y que la dispersión de esta energía fuera de su objetivo sea mínima. ≪ Así, si la civilización marciana está algo más avanzada que la nuestra, puede haber ideado medios económicos de comunicación electromagnética que no nos permiten captar nada desde la Tierra. A pesar de ello, si en Marte hay una civilización que está bastante más avanzada que la nuestra, es raro que no tengamos ninguna señal de su existencia (aunque si son ellos los que han escuchado la calidad de *nuestros* programas de televisión, ¡. . . quizá tengamos alguna pista de su ausencia!)

≪ El radioastrónomo americano Frank Drake, de la Universidad de Cornell, ha hecho ver que no se ha llevado a cabo ninguna investigación seria sobre la transmisión radio de banda estrecha de Marte. Se han hecho observaciones con receptores de banda ancha para medir sus temperaturas subsuperficiales pero, en busca de señales inteligibles, a lo sumo se han hecho esporádicamente y de modo informal. Por otra parte, Drake intuye que la probabilidad de éxito de ese programa es, probablemente, muy remota. Si los marcianos nos llevaran tanto como 50 años de adelanto, (con las reservas apuntadas) tendríamos que haber tenido otras señales de su existencia; si están 50 años atrás, son incapaces de transmitir por radio. Estas hipótesis se basan en la analogía terrestre y suponen que los avances recientes casi discontinuos de nuestra civilización técnica son característicos de cualesquiera otras civilizaciones. No sabemos con certeza que éste sea el caso, pero por otra parte, es muy lógico suponerlo puesto que no sabemos de casos en contra. Como tanto la Tierra como

Marte llevan existiendo 5×10^9 años, la probabilidad de una investigación con éxito de radioemisión marciana inteligible es de $50/(5 \times 10^9) = 10^{-8}$, o sea, de una millonésima por ciento. Así pues, al no prever la dedicación de tiempo para estas investigaciones de Marte, los directores de los radioobservatorios han obrado con sensatez. Y con todo, a causa del interés de la investigación, no sorprendería que de vez en cuando se robaran lapsos, entre programas de observación, para escuchar, con mezcla de ansiedad y esperanza al distante Marte. ≫

19

El planeta Marte

. . . Me inclino a creer que el suelo de Marte es de un tono más oscuro que el de Júpiter o de la Luna y que ésta es la razón de su aspecto cobrizo y de reflejar menos luz que la correspondiente a su distancia al Sol . . . Su luz y calor es dos y en ocasiones, tres veces menor que la nuestra, por lo cual supongo que la constitución física de sus habitantes es discutible.

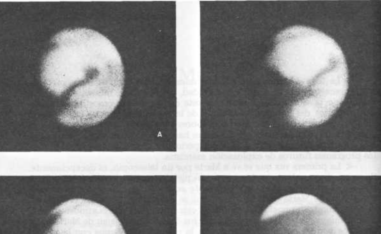
Christiaan Huygens, *Nuevas conjeturas respecto a los mundos planetarios, sus habitantes y producciones* (1670).

≪ Le toca el turno ahora a Marte, nuestro enigmático vecino planetario, que parece brindar la mejor oportunidad, en el futuro inmediato, para el estudio de la vida extraterrestre. En este capítulo trataremos de las condiciones físicas del entorno de Marte y de la posibilidad de que haya habido vida en la antigüedad de Marte y sobrevivido hasta el presente. Y en el próximo, de las pruebas observadas que han sugerido más directamente que Marte pueda albergar vida y de los experimentos que se han planeado para los programas futuros de exploración marciana.

≪ La primera vez que se ve a Marte por un telescopio, es decepcionante. Se ve un disco coloreado de ocre o una piel de naranja, que varía de brillo y parpadea, que se balancea erráticamente en el campo ocular del telescopio. El aspecto de Marte de fuego fatuo que se desvanece, se debe a la "visión" de movimientos atmosféricos erráticos cerca de la base de la atmósfera de la Tierra, que cambian las direcciones de los fotones que viajan de Marte hacia nosotros y que, por ello, distorsionan la imagen que vemos con la luz del Sol reflejada. Para conseguir una mejor imagen de la superficie marciana tendríamos que instalar nuestro observatorio a alturas superiores, de modo que la mayor parte de la turbulencia atmosférica quedara por debajo de nosotros. Las mejores observaciones visuales y fotográficas de Marte se han hecho con telescopios emplazados en cimas de montañas altas y, generalmente, aisladas. Entre los mejores observatorios para estudiar Marte se encuentran los del sudoeste americano y en el Pic du Midi, en los Pirineos franceses. En ellos apreciamos que la imagen de Marte es mucho más estable y podemos descifrar con bastante claridad detalles de su superficie. Sin embargo, Marte nunca aparece tan grande como para ocupar todo el campo ocular del telescopio. Por lo general, aparece como un disco pequeño de color naranja, con un diámetro angular no mayor que el de un cráter lunar de modesta dimensión.

≪ Si llevamos a cabo observaciones durante un período de tiempo, encontramos que algunas de las características de su superficie desaparecen por el borde o "limbo" occidental de Marte y que otras aparecen por el del este. Estamos observando la rotación del planeta. Con el tiempo, vemos rasgos ya conocidos que reaparecen por el limbo oriental; en tal momento, hemos observado una rotación completa (1). Marte da una vuelta sobre su eje cada 24 horas y 37 minutos, período que es justo 41 minutos más largo

1.- N. del T. Resoecto a nosotros.



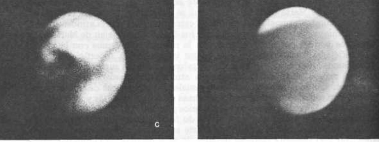


Figura 19-1. Cuatro fotografías de Marte. Contrariamente al convenio astronómico usual, en ellas el sur está abajo. Las figuras A, B y C se tomaron con luz roja e ilustran la rotación del planeta. La figura D se tomó con luz azul y pone de relieve la carencia de accidentes superficiales en el azul y violeta, fenómeno conocido como niebla azul. (Cortesía de los Observatorios de Monte Wilson y Monte Palomar.)

que el de rotación de la Tierra. En las fotografías A, B y C de la figura 19-1 puede apreciarse la rotación de Marte. La mancha del disco en la vista A, es Sinus Meridiani, que en la vista C está desapareciendo por el limbo del este. Observando la rotación de Marte delimitamos su ecuador y, por tanto, su eje de rotación, que resulta inclinado unos 24° respecto a la perpendicular al plano de su órbita; la inclinación del eje de rotación de la Tierra es, aproxi-

madamente, de 23 1/2°. Dado que el período de rotación marciano es parecido al nuestro, tiene igualmente un cielo de día y noche y, como los ejes de rotación de los dos planetas tienen inclinaciones casi iguales, las estaciones en la Tierra y en Marte tienen formas casi similares. Nadie sabe por qué los períodos de rotación y las inclinaciones de los ejes de la Tierra y de Marte son tan parecidos. Puede que sea una simple coincidencia o que quizá indique alguna relación más profunda entre ambos planetas cuyo origen se remonta al del sistema solar.

≪ Puesto que Marte está como un 50% más lejos del Sol, en promedio, que la correspondiente para la Tierra, su año es mucho más largo –de unos 687 días terrestres. Así pues, aunque el invierno dura la misma fracción del año marciano, que el nuestro respecto a nuestro año, su duración absoluta es casi de 200 días –verdaderamente, un invierno muy largo y muy frío, como veremos.

≪ Observando a Marte en condiciones de visibilidad óptimas (figura 19-2), podemos reconocer tres regiones principales: unos casquetes polares blancos, brillantes; unas zonas por lo general de color gris que suelen estar concentradas en las regiones ecuatoriales, y las zonas brillantes de color ocre o parecidas a piel de naranja, que dan a Marte su tono rojizo. Los casquetes polares, que se forman y menguan con las estaciones, estan constituidos por pequeñas partículas sueltas de agua helada, conocidas como escarcha en agujas. Este reconocimiento está basado en distintos argumentos, independientes unos de otros. Lo mismo que al pasar la luz a través de un gas absorbente se forman las rayas de absorción del espectro (véase el capítulo 4), cuando la luz es reflejada por un sólido, se forman bandas de absorción. En la reflexión, la luz penetra en realidad un pequeño espacio en el sólido y las longitudes de onda que corresponden a las de absorción características del material, son las que no aparecen en la luz reflejada. El hielo tiene un espectro de reflexión característico en el infrarrojo próximo, que coincide con el de los casquetes polares marcianos.

≪ Cuando un sólido refleja la luz del Sol, tiende a adquirir una polarización propia, no tan pronunciada como en la emisión sincrotrón (véase el capítulo 7), pero no obstante, detectable. La polarización de la luz del Sol reflejada por los casquetes polares de Marte, coincide exactamente con la misma reflejada en laboratorio por la escarcha en agujas. Y, finalmente, el brillo de los casquetes polares coincide con el de la escarcha en agujas. Así pues, incluso una simple ojeada a Marte con un modesto telescopio en buenas condiciones de visibilidad muestra el casquete de hielo polar cuya presencia pone de manifiesto que en Marte hay agua. Como hemos averiguado que el agua está íntimamente implicada en los procesos de la vida en la Tierra, esta simple observación justifica cierta primera esperanza de que Marte pueda también tener su biología propia.

≪ En la figura 19-3 pueden verse dos fases del casquete polar norte de Marte en regresión, dos dibujos representados como vistos desde su vertical.

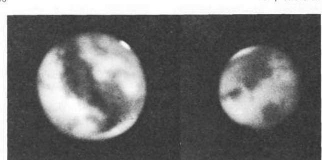


Figura 19-2. Dos fotografías de Marte tomadas en el Observatorio del Pic du Midi en los años 40. Ilustran la riqueza de detalles superficiales que se pueden fotografiar con condiciones de visibilidad excelentes. La fotografía de la izquierda, tomada al final de la primavera marciana, muestra un casquete polar sur muy pequeño. La región en forma triangular de abajo a la derecha es Syrtis Major. Sobre ella y a su izquierda están Mare Tyrrhenum y Mare Cimmerium. A la derecha, fotografía tomada a finales de otoño, vemos un casquete polar sur bastante mayor. La región al fondo a la derecha es Mare Acidalium; y sobre ella, arriba, está Solis Lacus. (Cortesía del Dr. A. Dollfus y del Meudon Documentation Center de la Unión Astronómica Internacional.)

El intervalo entre ambas vistas es de unos dos meses terrestres, durante la primavera del hemisferio norte marciano. Vemos que el casquete se retira hacia el polo dejando tras sí pequeñas islas de escarcha. Se ha postulado que esas regiones son alturas que retienen la escarcha más tiempo porque se encuentran más elevadas y están más frías. Uno de esos lugares, en que queda regularmente atrapada la escarcha, se denomina Montañas de Mitchell. Sin embargo, no es necesario que en Marte las alturas sean más frías, ya que pueden serlo simplemente porque reflejen más la luz del Sol.

≼ Por la velocidad de retroceso de los casquetes polares durante la primavera local, podemos calcular el espesor de los casquetes. Sabemos la cantidad de luz solar que incide en éstos y cuanta es absorbida por el hielo. Esta luz solar tiende a calentar el hielo y hacer que se evapore. Un casquete polar de mucho espesor parecería contraerse lentamente; otro, delgado, con rapidez. Para la cantidad de luz que recibe, el casquete de hielo retrocede bastante deprisa, lo cual nos permite llegar a la conclusión de que el espesor del hielo ha de ser, por lo general, de un centímetro o menos. Si se derritiera todo el casquete de hielo, con su agua quizá pudieran llenarse los Grandes

Lagos de América del Norte. Por tanto, aunque los casquetes indican la existencia de agua en Marte, no prueban que haya mucha cantidad.

≼ En realidad, parece ser que hay pocas probabilidades de que existan en Marte lagos de agua pura.

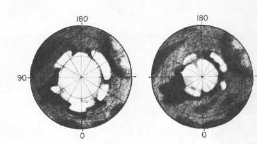


Figura 19-3. Dos fases del desarrollo promedio estacional del casquete de hielo polar norte. Estos dibujos están basados en las observaciones durante las oposiciones de 1946, 1948, 1950 y 1952. (Cortesía del Dr. A. Dollfus.)

Para que a una temperatura determinada se forme un líquido, la presión atmosférica tiene que ser superior a cierto valor. La atmósfera hace de tapadera sobre el cuerpo de agua. En el vacío, el agua se vaporizaría casi instantáneamente. La presión atmosférica total en Marte, de la que luego se hablará, es tan pequeña que no puede hacer de tapadera para mantener una bolsa de agua líquida; en su lugar, si se calienta el hielo de Marte, pasa directamente a vapor de agua, igual que en la Tierra, a presión atmosférica, observamos como el hielo seco (anhídrido carbónico, congelado) se convierte en CO_2 gaseoso cuando se calienta; nunca vemos CO_2 líquido a la presión de una atmósfera.

≼ Existe otra evidencia de la ausencia de masas libres de agua en Marte. Bajo ciertos ángulos de observación, tendríamos que ver una imagen brillante del Sol reflejada como en un espejo sobre las aguas de los hipotéticos lagos marcianos y, a pesar de lo mucho que se ha investigado, jamás se ha visto tal imagen. Podemos concluir con toda seguridad, que en Marte no existen masas abiertas de agua pura.

≼ Si bien los casquetes polares avanzan y retroceden según las estaciones, las regiones brillantes y las oscuras conservan, por lo general, sus configuraciones relativas. La figura 19-4 es un mapa de Marte en proyección

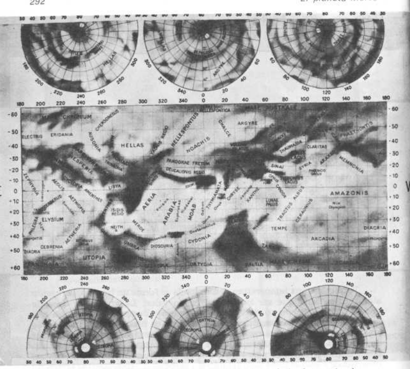


Figura 19-4. Cartografía de Marte de la Unión Astronómica Internacional. En este mapa sólo están ilustradas aquellas características que se han fotografiado durante varias oposiciones recientes. Los detalles más pequeños representados son de cientos de kilómetros.

mercator, como muchos de la Tierra. La escala vertical es la de las latitudes; la horizontal, la de las longitudes. Como los telescopios astronómicos invierten las imágenes, los astrónomos tienen tendencia a pensar en el sur como si estuviera "arriba", que es el convenio que se sigue en este mapa. Los rasgos representados y sus nombres, son aquellos que se han fotografiado repetidamente año tras año. Con las mejores condiciones de visibilidad, los

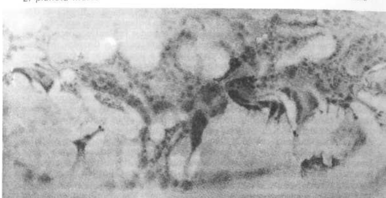


Figura 19-5. Mapa de Marte basado en las observaciones visuales del Dr. J. H. Focas. Es evidente la resolución de las regiones oscuras en los núcleos oscuros. Compárese con la figura 19-4. (Cortesía del Dr. J. H. Focas.)

observadores de Marte han notado que las regiones oscuras parecen, en realidad, estar compuestas por muchas manchas oscuras, a las que ahora se las llama núcleos oscuros (figura 19-5). Cuando las condiciones de visibilidad no son excelentes, los núcleos oscuros se difuminan y vemos a Marte, más o menos, como aparece en el mapa de la figura 19-4. Hay otros accidentes menos conspicuos, que no han podido fotografiarse, pero que sí pueden verse con un telescopio grande y buenas condiciones de visibilidad. De ellos hablaremos luego.

⩽ Hacia principios de siglo se dieron nombres a las regiones brillantes y oscuras de Marte, generalmente de origen latino o griego y algunas veces con copiosas alusiones a la antigüedad clásica. Así, Mare Erythraeum es "Mar Rojo", aunque no es ni rojo ni mar; Hellespontus es "El puente griego", aunque nada en realidad; Solis Lacus es "El lago del Sol"; Sinus Meridiani es "Bahía meridiana" porque el meridiano cero de Marte, correspondiente al de Greenwich en la Tierra, pasa por ella. Esto es, claro está, un convenio terrestre; los cartógrafos de Marte, si es que existen, tendrán otros. Y como augurio esperanzador para el futuro, en latitud 55° Norte y longitud 250° hay un lugar que muchos han estado investigando. Llama la atención pensar que estos lugares aterradores con nombres extraños — Trivium Charontis, Tithonius Lacus, Thoth-Nepenthes— lugares que hasta ahora solo se han

observado con potentes telescopios desde distancias inmensas, llegará un día, que muchos de nosotros aún verán, en que serán hollados por el hombre.'

≪ Aunque los perfiles generales de las regiones brillantes y oscuras con unas pocas excepciones, han permanecido fijas durante décadas, a veces vemos incursiones transitorias de una brillante a una oscura. Es como si una pequeña parte de la región oscura se hubiera destruido y substituido con el material clásico de piel de naranja de las regiones brillantes. La incursión puede avanzar oscureciendo grandes fracciones de las regiones oscuras. Se tiene toda la razón para creer que esas incursiones son grandes tormentas de polvo. La polarización de la luz reflejada por las regiones brillantes indica que están cubiertas por innumerables pequeñas partículas opacas. Las incursiones de las regiones brillantes en las oscuras presentan las mismas propiedades de polarización y llegamos a la conclusión de que las regiones brillantes de Marte son bastos desiertos y que, en ocasiones, los vientos transportan grandes cantidades de material de los desiertos a las regiones oscuras, ocultándonos temporalmente su visión. En 1956 se observó una tormenta de polvo de proporciones del ancho del planeta; durante casi un mes estuvo tapando casi todos los detalles del mismo. Y sin embargo, aun después de las más sorprendentes de estas tormentas de polvo, remiten los vientos y reaparecen las regiones oscuras. Si éstas son lugares de mayor altura que aquéllas, se comprende que puedan quedar ocultas por una tormenta de polvo y luego, barridas por los vientos, reaparecen a la vista del astrónomo. Recientemente, el astrónomo americano James Pollack y yo hemos hallado pruebas de radar que sugieren que las regiones oscuras están a mayores alturas sistemáticamente que los desiertos brillantes.

≪ La polarización de la luz reflejada en las regiones brillantes no sólo nos dice que éstas están cubiertas de polvo, sino también algo acerca de la composición de éste. De los cientos de minerales terrestres examinados en laboratorio, sólo uno –llamado limonita– presenta las mismas propiedades de polarización que las regiones de brillo marcianas. Cada molécula de limonita es un polihidrato de óxido de hierro, es decir, un compuesto de hierro y oxígeno, Fe_2O_3, que tiene varias moléculas de agua ligeramente enlazadas a él. La limonita da cuenta tanto de las propiedades de polarización de los desiertos marcianos como de su brillo y color.

≪ Las regiones oscuras de Marte también se han examinado polarimétrica y espectroscópicamente. La polarización de la luz reflejada en las regiones oscuras indica que también están cubiertas –o compuestas– por pequeñas partículas opacas, que todavía son más opacas que las ya muy opacas de los desiertos marcianos. Pollack y yo creemos que las partículas mayores de limonita, de décimas de milímetro, pueden ser también las causantes de las propiedades polarizantes y de la oscuridad de las regiones oscuras. En general, cuanto mayores son las partículas, más oscuras son. La naturaleza de las regiones oscuras marcianas nos lleva directamente a la cuestión de la posible existencia de vida en Marte, pero antes preferimos describir algunas otras características del entorno marciano.

≪ Igual, como ya vimos en los capítulos 3 y 4, que se pueden determinar las condiciones físicas de las estrellas por la luz que emiten, así tambien se pueden deducir, en parte, las condiciones físicas de las atmósferas y superficies planetarias por examen de la luz solar que refleja y de la radiación infrarroja y radio que emiten. La luz del Sol que se refleja en la superficie de Marte, pasa dos veces, inclinada, por la atmósfera marciana, cuyas moléculas suprimen preferentemente la luz solar a sus respectivas longitudes de onda de absorción y el espectro de reflexión de Marte contiene rayas y franjas igual que el de emisión de una estrella (capítulo 4). Así es como se han reconocido en la atmósfera marciana gases CO_2 y H_2O. La cantidad de vapor de agua en la atmósfera es, más o menos, igual a la cantidad de agua aprisionada en forma de escarcha en los casquetes polares. Como un 0,1 por ciento de la cantidad de vapor de agua de nuestra atmósfera. Por otra parte, la cantidad de dióxido de carbono en la atmósfera marciana es mucho mayor que en la nuestra –quizá treinta veces más, aunque aún no se sabe con certeza la cifra exacta. Se ha buscado infructuosamente el oxígeno. Si efectivamente hay, su presencia será como constituyente en trazas. La ausencia de oxígeno, evidentemente, no excluye forzosamente la existencia de vida en Marte, incluso en formas bastante avanzadas. (Véase el capítulo 14.)

≪ Si no hay oxígeno en la atmósfera marciana, no podemos esperar que haya ozono. En la atmósfera de la Tierra, el ozono absorbe luz ultravioleta entre los 2000 y los 3000 Å luz, que, de otro modo, sería letal para la mayor parte de los organismos terrestres. ¿Significa la ausencia de ozono que la superficie de Marte está bañada por radiación ultravioleta? Si hubiera algún otro absorbente atmosférico, bien en forma de gas o de aerosol sólido, la luz ultravioleta no podría llegar a la superficie. Cuando se observa Marte con luz visible ordinaria, aparece como en la figura 19-1 A, B y C. Por otra parte, cuando se observa con luz ultravioleta, vemos algo parecido a la figura 19-1D. Hace resaltar la región polar, pero casi se desvanecen todos los detalles superficiales de las demás regiones. La fuente de este fenómeno misterioso se llama "niebla violeta" o "azul", aunque quizá no sea en realidad ni niebla ni azul o violeta. Si es una niebla, absorbe luz azul, violeta y ultravioleta y transmite la de longitud de onda más largas. Si tuviéramos algo de ella en una botella –cualquier cosa que sea– la veríamos roja. Si la niebla azul marciana es algún absorbente atmósferico no identificado, en tal caso, la intensidad de la luz solar ultravioleta en la superficie de Marte podría ser pequeña. Sin embargo, una observación de Marte realizada con luz ultravioleta por un cohete, implica la ausencia de absorbentes atmosféricos efectivos a esas longitudes de onda. ¿Qué es lo que produce pues la niebla azul? Hemos postulado que las partículas de limonita cubren tanto las regiones brillantes como las oscuras y que las de mayor tamaño están en estas últimas. Con los tamaños de partículas necesarios para explicar el brillo y la polarización, Pollack y yo hallamos que las regiones brillantes y las oscuras reflejan igualmente bien a longitudes de onda del violeta y del ultravioleta. Basados en esto, suponemos que el contraste entre brillo y oscuro tiene que desapare-

cer en el violeta y en el ultravioleta. Así pues, la "niebla azul" puede ser simplemente un efecto superficial y si nuestra suposición es cierta, la luz ultravioleta tiene que penetrar bastante en la superficie, representando, quizá, un riesgo más para los organismos de Marte.

⩽ Además del oxígeno y también con resultados negativos, se ha buscado en la atmósfera de Marte la existencia de muchos otros gases. Por un radioexperimento del vehículo espacial de los Estados Unidos, Mariner IV y por la forma de las rayas de absorción en su atmósfera, se puede determinar la presión atmosférica total en la superficie de Marte, cuyo valor resulta ser de 10^{-2} atmósferas, es decir, como el 1,0 por ciento de la presión atmosférica total en la Tierra. Si añadimos el dióxido de carbono y el vapor de agua que se han identificado en la atmósfera marciana, vemos que hay en ella algo inexplicable. Tiene que haber otros gases que aún no hemos hallado. Algunas moléculas, como las de N_2 y las de los gases nobles, tienen sus rayas de absorción en las longitudes de onda del ultravioleta que no podemos observar desde la superficie de la Tierra por la propia absorción en nuestra atmósfera. El nitrógeno lo tenemos presente nosotros en grandes cantidades (78%) y su abundancia cósmica es grande. Por estas razones los astrónomos han llegado a la conclusión de que parte de la atmósfera de Marte está compuesta por nitrógeno molecular. Pero esto es un argumento por falta de pruebas y tendrán que efectuarse observaciones ultravioletas directas de Marte –por ejemplo, poniendo en órbita por encima de su atmósfera observatorios astronómicos– para comprobar la presencia y abundancia de nitrógeno en Marte.

⩽ Cabe mencionar otro gas, que se ha empleado en los argumentos acerca de la existencia de vida en Marte. En 1956 el astrónomo americano C. C. Kiess, de la Universidad de Georgetown, y sus colaboradores, lograron un espectro de Marte que parecía mostrar unas débiles características de absorción en las partes azul, verde y amarilla del espectro. Ensayaron hacer coincidir esas características con las de muchos gases y llegaron, al final, a que solamente el dióxido de nitrógeno, NO_2, podía dar cuenta de las observaciones. Kiess y sus colaboradores mantuvieron que las cantidades de este gas venenoso eran tan grandes como para excluir la posibilidad de toda vida indígena en aquel planeta. Este argumento fue aceptado y ampliado por otros y utilizado para sostener que era innecesaria la futura exploración biológica de Marte por naves espaciales, porque era imposible que hubiera vida allí.

⩽ Esta conclusión hay que considerarla un poco prematura, ya que Kiess y sus colaboradores nunca calcularon realmente cuanto dióxido de nitrógeno resultaba de sus observaciones. Si se efectúan dichos cálculos, se demuestra que la cantidad de NO_2 en la atmósfera marciana es del orden del 0,001 por ciento.

⩽ ¿Y no podría, incluso esta cantidad, resultar suficiente para representar, como mínimo, un impedimento químico para los marcianos? Por medios casi análogos se puede medir la cantidad de NO_2 en nuestra atmósfera. Por

ejemplo, se puede dirigir hacia el Sol un espectrómetro y registrar en una placa la absorción por el NO_2 de la atmósfera que tiene encima. Como el NO_2 es un constituyente principal de la niebla industrial y de las demás contaminaciones urbanas, esos estudios se efectuan casi de rutina en ciudades como Los Angeles. Se observa que el contenido en NO_2 de la atmósfera varía con el tiempo. Un modelo clásico para Los Angeles tiene abundancia máxima de NO_2 a las 8 y a las 17 horas y puntas accidentales a las 19 y a las 23 (todas horas legales). Las puntas corresponden a las horas de actividad matinal y nocturna y, probablemente, a los coches de los habitantes de esa exótica ciudad que regresan de sus actividades sociales nocturnas. Estos estudios abren por completo nuevos campos de investigación, tales como la sociología espectroquímica. Pero el punto importante es que la cantidad promedio de NO_2 sobre la ciudad de Los Angeles es mayor que la cantidad promedio de NO_2 en la atmósfera de Marte. Las condiciones en Los Angeles, aunque inclementes por sus normas de vida, no la excluyen y lo mismo se puede aplicar a Marte.

⩽ Observando las emisiones infrarrojas y radio que Marte emite al espacio, se puede obtener un cuadro aproximado de cuáles son las temperaturas en su superficie. En una localidad promedio, en el desierto marciano ecuatorial, en verano, cerca del mediodía, una temperatura clásica podría ser la de 20° C, o sea, algo superior a la temperatura ambiente de Gran Bretaña. Sin embargo, esa misma noche, la temperatura descendería casi verticalmente a 70° u 80° bajo cero. Se ha descrito que Marte tiene un clima extremadamente continental. A medida que nos acercamos a los polos, las temperaturas medias resultan menores y más suaves las variaciones diurnas. Para una latitud, longitud, estación y hora del día medias, la temperatura promedio podría estar entre −30° y −40° C. No hay un solo lugar en Marte que esté las 24 horas del día por encima del punto de congelación del agua, si bien hay algunos que son mucho más calurosos que otros. A pesar de nuestra tendencia terrestre a considerar los desiertos como lugares más calientes que los demás, las zonas brillantes de Marte tienden a estar más frías que las oscuras, en parte, porque al ser más brillantes, absorben menos luz solar durante el día. Los núcleos oscuros de las regiones oscuras son verdaderamente muy oscuros; por tanto, absorben significativamente más luz del Sol que los desiertos. A pesar de que incluso en esos núcleos, por las noches, las temperaturas suelen ser bajas, durante la primavera y verano locales las temperaturas medias de las horas diurnas de un núcleo oscuro tienden a mantenerse por encima del punto de congelación del agua.

⩽ Marte, se muestra pues, frío, árido y escaso de oxígeno. Un hombre colocado en Marte sin equipo protector, se asfixiaría antes de llegar a congelarse. De otro modo, moriría de sed o abrasado por la luz ultravioleta. Pero los hombres no son los únicos organismos sobre la Tierra; las formas más omnipresentes de vida terrestre son las de los microorganismos. ¿Qué sucede si inoculamos un entorno marciano simulado con microorganismos terrestres? Estos experimentos se han realizado prácticamente. Se prepara una cámara

con polvo de limonita seco a presión reducida, se introduce en ella una atmósfera carente de oxígeno, compuesta principalmente por CO_2 y N_2. Una lámpara de luz ultravioleta alumbra sobre la limonita y la cámara completa se somete a un ciclo diario de congelación-deshielo. Estas cámaras se conocen como "recipientes de Marte". Quizá con sorpresa, cuando se colocan en tal ambiente muestras de suelo terrestre rico en microorganismos, aunque algunos mueren, la mayor parte después del primer ciclo de congelación-deshielo, hay una fracción apreciable que sobrevive indefinidamente. Entre los supervivientes hay gran variedad, contándose entre ellos, tipos que forman esporas y tipos que no las forman. La luz ultravioleta mata a los microorganismos que tienen la desgracia de exponerse; aquéllos que se ocultan bajo las rocas, sobreviven. No necesitan oxígeno, las temperaturas no les preocupan y el poco contenido de agua les basta para sus necesidades. Si el contenido de agua aumenta, lo cual puede suceder, por ejemplo, en la primavera marciana, se observa entonces cómo los microorganismos supervivientes crecen y se reproducen. ≫

Es importante recordar que las personas en la Antártica viven a temperaturas que están dentro de los intervalos hallados en las regiones polares marcianas. La mínima de todas las temperaturas registradas en la Tierra, fue de −82° C, en la Antártica. El hombre que vive allí crea su propia biosfera artificial, pero los organismos tienen gran capacidad para la adaptación evolutiva a condiciones ambientales severas y la inclemencia de las condiciones climáticas de Marte no excluyen por sí solas la posibilidad de vida.

≪ Esos experimentos de simulación ponen claramente de relieve la cuestión de la vida en Marte. Indican que existen mecanismos biológicos perfectamente adecuados para sobrevivir en las condiciones medias marcianas y desarrollarse cuando sean relativamente favorables. Dado que hay pocos ambientes terrestres naturales casi tan rigurosos como los de Marte, es sorprendente que los organismos terrestres posean capacidad de supervivencia marciana, como en realidad tienen. Dichos experimentos, —clase de selección natural a escala de laboratorio— solamente se han mantenido durante períodos de meses. Si imaginamos que su duración fuera mucho mayor, podríamos ver como por mutación y selección tendría lugar un proceso evolutivo a lo largo del cual aumentarían los supervivientes mejor adaptados al recipiente de simulación de Marte. Podemos suponer que de igual forma evolucionan los organismos marcianos a formas mejor adaptadas dentro de su propio ambiente. Por cuanto sabemos, formas de vida mucho más avanzadas que la de los microorganismos, podrían haber evolucionado bajo tales circunstancias. Aun cuando estos experimentos aumentan la admisibilidad de vida indígena en Marte, es claro que no demuestran realmente su existencia.

≪ Pero tales experimentos sí tienen verdadera importancia respecto a la contaminación biológica de Marte. Supongamos que en futuros intentos de exploración marciana chocara una nave espacial contra el suelo de Marte. En su vuelo desde la Tierra, ese vehículo habría quedado esterilizado exteriormente por la radiación ultravioleta solar, pero no por su interior, ya que la radiación no la penetra, y todos los organismos presentes en la nave en el momento del lanzamiento sobrevivirían después del impacto contra Marte; si la nave se rompiera, quedarían los microorganismos terrestres sobre la superficie marciana. Si no se toman las precauciones antes del lanzamiento, todos los materiales del interior de la nave tendrán gran cantidad y compleja de microorganismos terrestres. Como hemos visto, en Marte reinan los vientos y las tormentas de polvo, y los microorganismos se distribuirían por toda la superficie del planeta. También es posible que a la superficie de Marte llegue algo de radiación ultravioleta y que los microorganismos —o "microbios", como dicen los microbiólogos de modo afectuoso pero incorrecto— no murieran por la luz solar germicida, pues aun cuando fuera grande el flujo ultravioleta, sobrevivirían perfectamente los microbios que se adherieran a partículas de polvo.

≪ En la reproducción microbiana existe cierto "interés compuesto". En ausencia de predadores o competidores los microbios se reproducen en forma exponencial. A modo de ejemplo sencillo consideremos un microbio depositado en un ambiente en el cual crece muy lentamente. Hay microorganismos terrestres que se reproducen cada hora, pero supongamos que el microorganismo en cuestión se reproduce en Marte cada treinta días. Así pues, al cabo de treinta días tendremos dos organismos; a los sesenta días, $2 \times 2 = 4$ organismos. Transcurridos 300 días ($n = 10$) tendríamos 2^{10} ó aproximadamente 10^3 microorganismos. A los 1500 días ($n = 50$), período un poco más largo que dos años marcianos, habría $2^{50} = (10^3)^5 = 10^{15}$ microorganismos. Y después de ocho años terrestres (unos 3000 días, $n = 100$), tendríamos $2^{100} = (10^3)^5 = 10^{30}$ microorganismos, número que es mayor que toda la población microbiana del planeta Tierra. Este ejemplo pone de manifiesto la gravedad de la contaminación biológica de Marte.

≪ Tenemos la sospecha de que en Marte ya existen, al menos, algunos microorganismos y queremos observarlos minuciosamente. ¿A qué se parecen? ¿Cómo están formados? ¿Cómo funcionan? ¿Están compuestos por células? ¿Está constituida la materia hereditaria básica de ácidos nucleicos? ¿Emplean las proteínas como catalizadores? Como se ve, es larga la lista de cuestiones biológicas básicas a resolver.

≪ Supongamos ahora que a pesar del peligro de contaminación biológica, enviamos a Marte una nave espacial no esterilizada para saber más, por ejemplo, acerca de las condiciones físicas de su entorno. En los últimos lanzamientos enviamos instrumentos ideados para descubrir y caracterizar organismos marcianos indígenas, si es que los hay y, efectivamente, encontramos microorganismos que son muy parecidos a los microbios terrestres. ¿Cuál será nuestra conclusión? ¿Que se han desarrollado independientemente en ambos planetas formas semejantes? ¿Que Marte y la Tierra debieron haber tenido en el pasado algún contacto biológico común? ¿O que una nave espacial de la Tierra inadvertidamente depositó organismos en una misión anterior? La contaminación biológica de Marte sería una catástrofe biológica

de importancia. Por esta razón se ha anunciado por la Aeronáutica Nacional y Administración del Espacio, de los Estados Unidos (N.A.S.A.), un programa de esterilización y descontaminación de las naves espaciales. Pero los Estados Unidos no es la única nación que viaja por el espacio. La Unión Soviética tiene capacidad inminente para aterrizar en Marte y otras naciones en un futuro no muy lejano, quizá participen también en la búsqueda de vida en Marte. Poco importa que sean los rusos o los americanos los que contaminen Marte: los microorganismos no entienden de nacionalidades. Si no hacemos nada por nuestra parte, pueden llegar a no respetar ni siquiera las fronteras interplanetarias. Por esta razón causa alegría saber que la Unión Soviética ha mostrado su complacencia a esterilizar sus naves espaciales. Se hizo lo posible para esterilizar el cohete lunar soviético Luna II y, en mayo de 1964, en una reunión del Comité de Investigación Espacial del Consejo Internacional de los Sindicatos Científicos, los representantes soviéticos decidieron la exigencia de esterilización rigurosa de los vehículos espaciales que se lanzarán hacia Marte. En este campo de la exploración del espacio, los pueblos del planeta Tierra parecen tener un propósito común singularmente adaptado a nuestra primera aventura en otro mundo.

≪ Hemos procurado conocer el ambiente de Marte; lo encontramos riguroso, pero, probablemente, no tan riguroso para los organismos indígenas. Y con todo, está claro que los organismos no podrían haberse originado y evolucionado en un planeta semejante al Marte contemporáneo. (Véase el capítulo 16.) ¿Pudieron haber sido más benignas las condiciones en el Marte primitivo? Como hemos visto en los capítulos 11-13 hay buenas pruebas para sostener la creencia de que todos los planetas del sistema solar se formaron de modo análogo, de la misma nube de gas y polvo que tenía composición química reductora. No hay razón para poner en duda que la atmósfera primitiva de Marte fuera reductora; que debido a un efecto de invernadero atmosférico, las temperaturas eran más templadas y que pudieron existir algunas masas libres de agua, aunque estas cuestiones no están demostradas rigurosamente. El cambio del entorno primitivo de Marte al actual ha de haber tenido la misma causa que la transición de la atmósfera terrestre de primitiva a contemporánea, es decir, el escape atmosférico. Marte tiene una masa menor y, por tanto, brinda mayor oportunidad a una molécula determinada a escapar de su campo gravitatorio. Como la atmósfera de Marte se pierde lentamente por evaporación al espacio, en los evos del tiempo geológico, las condiciones atmosféricas se hicieron menos reductoras, las temperaturas superficiales descendieron y llegó el momento en que la mayor parte del agua se evaporó al espacio o quedó congelada bajo su superficie. Como estos cambios fueron graduales, fácilmente podemos imaginar la adaptación por selección natural de los organismos marcianos a las condiciones cambiantes.

≪ La composición de los desiertos marcianos corrobora algo esta hipótesis. Como ya vimos al principio del capítulo, la polarización de la luz reflejada por los desiertos tiene todo el aspecto de que éstos están compuestos por limonita $Fe_2O_3 \cdot nH_2O$. En la Tierra se encuentra la limonita principalmente en lugares de clima ecuatorial, mezclada con hematites y bauxita formando parte de suelos lateríticos. Ambos, la limonita y el suelo laterítico, están muy oxidados y tienen gran contenido de agua; en la primera, del 5 al 10% de su masa corresponde a agua. La limonita terrestre y los suelos lateríticos se forman, según opinión de los geólogos, solamente en presencia de oxígeno en ambientes cálidos y húmedos. Marte hoy día no tiene oxígeno; es frío y árido. Sólo podemos comprender la presencia de grandes cantidades de limonita en Marte si postulamos la existencia de condiciones anteriores muy parecidas a la de la zona tropical de la Tierra. Si la limonita necesita oxígeno molecular para su formación, tenemos entonces la prueba de que hubo una época en la historia en la cual Marte tuvo una atmósfera oxidante; atmósfera que seguramente ya se ha escapado al espacio o reaccionado químicamente con el suelo de Marte.

≪ Como vimos en el capítulo 16, el oxígeno de la atmósfera terrestre está, probablemente, producido por la fotosíntesis de las plantas. ¿Pudo haber sido éste también el caso para Marte? ¿Fue Marte un tiempo exuberante y verde? Aunque el oxígeno quizá no sea necesario para formas de vida avanzada, los únicos ejemplos que nosotros tenemos aquí en la Tierra indican su utilidad para extraer energía de los alimentos. ¿Pudieron desarrollarse en Marte, en épocas ya muy remotas, formas de vida avanzada, que sólo más tarde quedaron aniquiladas al escaparse el oxígeno al espacio y reaccionar con la corteza? ¿O, podría haber en Marte organismos que se adaptaran al cambio ambiental, por medios o de formas que todavía apenas vislumbramos? ≫

del color. Los colores complementarios al rojo anaranjado de las regiones brillantes marcianas son los verdes y los azules y, nuevamente, las regiones oscuras de color neutro de Marte quedan investidas con una coloración adulterada azul-verdosa. La confusión producida por la luz extrafocal y por efectos de contraste de colores, puede suprimirse utilizando un potente telescopio reflector provisto de diafragma. Este aisla una región oscura, de modo que deja invisibles las regiones rojizas brillantes contiguas. El telescopio reflector elimina la luz azul extrafocal. En estas condiciones, las regiones oscuras aparecen casi en color gris neutro. Hay cierta tendencia a que las regiones oscuras aparezcan ligeramente rojizas, lo cual no es sorprendente porque en ellas también tiene que haber algo de la sustancia polvorienta de las regiones brillantes. En los años recientes se han observado ocasionalmente sutiles y delicados colores, pero que están a gran distancia de aquellos de los tiempos antiguos que en las descripciones científicas de Marte se definían como "chocolate", "carmín", "verde" y "sangre de dragón".

⩽ Los cambios de color que se han registrado en Marte son probablemente, en gran parte, también ilusorios. Como ya hemos mencionado, dada una superficie brillantemente coloreada de tono rojo o anaranjado, colocada al lado de otra de color gris neutro, el ojo aprecia en esta última cierto color azul-verdoso. Ahora bien, si la superficie oscura cambia su oscuridad –es decir, varía su contraste con la brillante– parecerá que cambia de color. La interpretación del ojo de las variaciones de contraste como variaciones de color es, en realidad, uno de los principios del procedimiento Land de la fotografía en color. Por tanto, si las regiones oscuras marcianas cambian de brillo no ha de sorprendernos que nos parezca que cambian de color.

⩽ ¿Queda pues excluida la posibilidad de vegetación en las regiones oscuras marcianas si es que en vez de verdes son de colores neutros? Es cierto que las plantas terrestres que más se ven son de color verde. Dicho color se debe a una molécula muy específica y omnipresente conocida como clorofila, aceptadora de fotones, que interviene en la primera etapa de la larga cadena fotosintética que convierte la energía de la luz solar en los enlaces ricos en energía de la molécula de ATP. (Véanse los capítulos 14 y 17.) La clorofila parece verde porque absorbe las radiaciones roja y azul y la parte central del espectro la refleja la planta y nos da su tono verdoso.

⩽ Las propiedades de absorción de la clorofila dependen con rigor de su estructura molecular. Un pequeño cambio en los grupos laterales moleculares puede producir un cambio importante en las propiedades de absorción de la molécula. Gran parte del espectro solar está en las longitudes de onda del amarillo y del verde, que la clorofila tiende a rechazar. Para aprovechar estos fotones amarillos y verdes, las plantas de la Tierra han hecho muchas adaptaciones especiales. Muchas plantas emplean gran variedad de pigmentos accesorios, moléculas bastante diferentes de la clorofila, como los carotenoides, que dan su color peculiar a las zanahorias. En este caso, son las partes anaranjada y roja del espectro las que menos se aprovechan y, las de longitudes de onda más cortas, incluidas la luz verde y la azul, las que se absorben.

Las plantas superiores concentran grandes cantidades de clorofila, de modo que la absorción relativamente débil en el amarillo y en el verde se compensa por el gran número de absorbedores. No parece que haya ninguna ventaja adaptativa particular a la coloración verdosa de las plantas; lo más probable es que sea un accidente histórico, es decir, que en la época del origen de las plantas se desarrollaron moléculas de clorofila que absorbían principalmente las radiaciones rojas y las azules y toda la posterior evolución vegetal se basó en las adaptaciones primitivas. En lugar de cambiar los principios fundamentales, las plantas han hecho adaptaciones accesorias para corregir las deficiencias fotosintéticas más groseras.

⩽ Es del todo posible que en otro planeta fueran otros pigmentos los que evolucionaran antes al principio de la vida; en realidad, no hay razón para suponer que la vegetación extraterrestre tenga que ser verde. De hecho, un color neutro, como el castaño, el gris o el negro, es ventajoso para el frío Marte, pues no repele ninguna parte del espectro y aprovecha todos los fotones, ya sea para la fotosíntesis o simplemente para calentar la planta. Las coloraciones neutras pueden ser mucho más lógicas que las verdes para las plantas marcianas. Esto es un punto que ha puesto de relieve G. A. Tikhov, antiguo director del primero y único instituto de Astrobotánica del mundo, en Alma Ata, Kazakhstan, URSS. Este instituto, que actualmente ya no existe, fue un foco inicial del entusiasmo soviético por la vida extraterrestre en una época en la cual el tema carecía tanto de métodos de observación sólidos como de la ayuda de la comunidad científica.

⩽ Aunque algunos rasgos de la superficie de Marte, como Syrtis Major, fueron ya observados en el siglo XVIII, no fue hasta finales del XIX que se trazó el primer mapa sistemático de Marte con la ayuda de los telescopios adecuados. Muchos de nuestros nombres actuales de la superficie de este planeta proceden de aquella época. Uno de los principales cartógrafos marcianos fue el astrónomo italiano Giovanni Schiaparelli (2). En 1877, durante las observaciones casi rutinarias de Marte en condiciones de visibilidad relativamente buenas, le sorprendió ver unos rasgos rectilíneos, oscuros y largos que parecían enlazar unas regiones o manchas oscuras con otras, atravesando miles de kilómetros de los desiertos marcianos. Schiaparelli los llamó "canali", que en italiano significa canales o surcos. Sin embargo, se tradujo a los demás idiomas como "canales", substantivo que suscita más la idea de ingenio racional que de accidente natural.

⩽ La existencia y significado de los canales fue defendido con mucha más elocuencia unas cuantas décadas más tarde, tanto en las obras científicas

2.- N. del T. 1835 - 1910. Descubridor de los célebres *canales* de Marte. Con las observaciones que hizo de este planeta durante sus oposiciones de 1877 a 1888, trazó la carta que lleva su nombre, con los nombres de las distintas manchas y "canales".

como en las literarias, por Percival Lowell (3), diplomático americano convertido en astrónomo, que montó un observatorio en Flagstaff, Arizona, con el propósito expreso de estudiar a Marte. Las condiciones de visibilidad en Arizona eran superiores a las de la mayoría de los observatorios de aquel tiempo. Las ulteriores observaciones que registraron Lowell y sus colegas dieron lugar a una representación coherente de Marte en la que se veían unos trazos rectilíneos, largos, que cruzaban los desiertos marcianos. Aparentemente sufrían cambios de color y de brillo con las estaciones. A veces, una de esas líneas parecía dividirse en dos. Las líneas no se interrumpen nunca en ningún lugar desierto, sino que continúan siempre de mancha oscura a mancha oscura. Las líneas rectas, decía Lowell, no son rasgos naturales; en consecuencia, tienen que ser artificiales. Si efectivamente los canales son artificiales ¿cuál es su función? Ya a principios de este siglo se sabía que el campo gravitatorio de Marte no era probable que retuviera una gran atmósfera y que en su superficie no abundaba el agua líquida, Lowell supuso, en consecuencia, que la función de los canales era transportar el agua desde los casquetes polares a los sedientos marcianos residentes en las oscuras regiones ecuatoriales. A los pequeños núcleos oscuros que se observaban en las interconexiones de diversos canales, se les llamaba apropiadamente "oasis".

≮ Inmediatamente se hicieron dos objeciones científicas a la teoría de los canales, que rebatieron Lowell y sus colaboradores, con argumentos cuyas respectivas valideces prevalecen todavía. En primer lugar, se dijo que los anchos asignados a los canales eran demasiado estrechos para poderlos detectar con el poder resolutivo de los telescopios empleados. Lowell demostró que las líneas rectilíneas largas sobre fondos de mucho contraste se podrían ver incluso si sus anchuras fueran bastante inferiores al poder resolutivo teórico y realizó un experimento en Flagstaff, Arizona, con los cables de transporte eléctrico aéreo, demostrando que podía situarse lejos de los cables y seguir detectando la presencia de los mismos.

≮ La segunda objeción fue que los canales eran demasiado anchos - muchos kilómetros mucho más anchos que lo necesario para conducir las aguas del hielo de los casquetes polares. La réplica de Lowell fue la siguiente:

> El hecho fundamental de la cuestión es la carestía de agua. Si tenemos esto presente, veremos que muchas de las objeciones que se levantan caen por su propio peso. La supuesta tarea hercúlea de construir esos canales desaparece inmediatamente, pues si los canales se dragaron con fines de riego, es evidente que lo que nosotros vemos y que por elipsis llamamos canales, no son en realidad para nada canales, sino la franja de tierra fertilizada que lo bordea –el hilero de agua por su centro, o sea el propio canal, es demasiado estrecho para poderlo ver. En el caso de un canal de riego observado a distancia, no es el canal en sí, sino siempre la franja de vegetación verde lo que se ve, tal como ocurre si contemplamos desde muy lejos un terreno irrigado de la Tierra.

3.- N. del T. 1855 - 1916. A partir de 1893 se esforzó en confirmar el descubrimiento de Schiaparelli de los canales. Por el mismo método que Le Verrier descubrió Neptuno (estudio de las perturbaciones en la órbita de Urano), determinó en 1915 la órbita del cuerpo perturbador y su posición en el cielo tal como más tarde descubrió, con un error de 6° sobre la predicción, el 13 de marzo de 1930 Clyde William Tombaugh, el planeta Plutón en el observatorio montado por aquél en Arizona.

≮ Con estos éxitos en el diálogo científico, Lowell y sus seguidores levantaron una pirámide invertida de deducciones con el vértice descansando en las observaciones de los canales. Los canales eran una obra de ingeniería enorme; por tanto, los marcianos, tecnológicamente, están actualmente más adelantados que la sociedad humana. Es evidente que los canales cruzan lo que denominaríamos fronteras internacionales, luego en Marte existe un sistema de gobierno mundial. Uno de los seguidores de Lowell fue tan lejos, que llegó a colocar la capital en Solis Lacus (latitud 30° S, longitud 90°, en la figura 19-4). Se discutió la cuestión de la ingeniería hidráulica y Lowell describió unos patéticos seres de raza superior empeñados con heroicidad en mantener su civilización en un planeta agonizante. Las ideas de Lowell fueron llevadas en forma de ficción por Edgar Rice Burroughs a una serie de libros sobre John Carter, un aventurero terrestre que andaba inquieto de una parte a otra de Marte y con su obra dio a conocer las ideas de Lowell a mucho más público.

≮ Lowell desarrolló una larga cadena de argumentos, basados en su esencia en la realidad de los canales como rasgo genuino de la superficie marciana. ¿Pero, había realmente canales en Marte o, como con cualquier otra belleza, estaban en el ojo del espectador? Durante decenios perseveró el debate científico crítico y, aunque se resolvió prácticamente del todo, todavía se oye a veces hablar de ello en las obras científicas contemporáneas. Si Lowell no se hubiera pronunciado tanto, si no hubiera dirigido su elocuencia al público en general, probablemente se hubiera acabado mucho antes el debate. Se hizo tan desagradable y tan inútil en opinión de tantos científicos, que llevó al éxodo general de la astronomía planetaria a la estelar, instigados en gran parte por las grandes oportunidades científicas que surgían entonces de la aplicación de la física moderna a los problemas estelares. La escasez actual de astrónomos planetarios puede estar influida grandemente por esos dos factores. Para dar una idea de lo que era ese debate, transcribo dos informes de eminentes y hábiles observadores planetarios:

> He estado observando y dibujando la superficie de Marte. Está maravillosamente llena de detalles. En verdad que no hay duda respecto a la existencia de montañas y grandes altiplanos. Para salvar mi conciencia no puedo creer en los canales tal como los describe Schiaparelli. Veo detalles que no ha representado. Veo detalles donde están algunos de sus canales, pero no son, *en absoluto*, líneas rectas. Cuando mejor se ven, son irregulares y discontinuos –es decir, algunas de las regiones de sus

anchas, llamadas a veces canales, tales como Thoth - Nepenthes (latitud 20° N, longitud 260° en la figura 19-4 y fotografía de la izquierda de la figura 19-2). La placa fotográfica tiene la ventaja de la objetividad, pues en la fotografía es raro que la creencia de lo que se desea haga aparecer los canales. Sin embargo, tiene el inconveniente de que la observación de Marte precisa de un tiempo de exposición, comprendiendo intervalos en los que la visibilidad varía de poca a óptima. La placa fotográfica registra una media, mientras que el ojo puede recordar el instante de máxima visibilidad. Para registrar en las fotografías los detalles que Schiaparelli y Lowell interpretaron como canales, se necesita una resolución que no se puede obtener desde la superficie de la Tierra. Estamos como peces en las profundidades del océano, ansiando ver los vuelos de las águilas.

⩽ Los telescopios llevados a la estratosfera en globos o montados en naves espaciales que se aproximen a Marte obtendrán en un futuro no muy lejano, la representación fotográfica precisa de los rasgos interpretados anteriormente como canales. Esos rasgos han de significar algo; aunque no guarda relación con los detalles de la Luna, observada con los mismos telescopios que Marte, nadie ha visto nunca canales en la Luna. Marte tiene rasgos propios, distintos de los canales de Lowell, pero que son la base de los informes sobre los mismos. Una hipótesis reciente dice que son cordones de dunas de arena. Así, aunque casi con certeza no sean las grandes obras de ingeniería de una civilización marciana avanzada, su estudio nos puede proporcionar una mayor comprensión del entorno marciano. Mientras tanto, la controversia ha servido, al menos, para poner de relieve los peligros de sacar demasiadas conclusiones de demasiados pocos datos. Como dijo el químico sueco Arrhenius (1918):

> Es muy popular la teoría de que en Marte hay hombres inteligentes. Con su ayuda se puede explicar todo, sobre todo si les atribuimos una inteligencia muy superior a la nuestra, de modo que no siempre somos capaces de examinar a fondo la sabiduría o buen criterio con que construyeron sus canales . . . El inconveniente de estas "explicaciones" es que lo explican todo y, por tanto, nada en realidad.

⩽ La mayoría de las pruebas presentes que sugieren vida en Marte son de caracter diferente. Cada año, cuando los casquetes de hielo de Marte receden hacia los polos, liberan a la atmósfera cantidades apreciables de vapor de agua. La circulación atmosférica en Marte, aparentemente es adecuada para transportar este vapor de un lado a otro del ecuador, de modo que el agua que libera un casquete al retirarse del polo, se aprovecha para rehacer el casquete polar del hemisferio opuesto. El radio de Marte, R, es de 3380 km; su circunferencia, $2\pi R$, y la distancia de un polo al otro πR. El vapor de agua invierte medio año marciano en ir de polo a polo, o sea, aproximadamente $687/2 = 344$ días; la velocidad media a la cual el vapor de agua va de un polo al otro es, por lo tanto, igual a $\pi R/344$, aproximadamente 30 kilómetros por día.

⩽ Al mismo tiempo que se transporta por la atmósfera el vapor de agua, en la superficie tiene lugar un fenómeno notable conocido como ola de oscurecimiento. Las manchas oscuras oscurecen progresivamente y aumenta su contraste con las brillantes que no cambian. Esto sucede con movimiento ondulatorio; avanzando el frente de la ola de oscurecimiento desde el casquete que se vaporiza hacia el ecuador y pasa al hemisferio opuesto. Medio año más tarde tiene lugar la ola en sentido opuesto. La ola de oscurecimiento no está sujeta a las incertidumbres de la astronomía ocular. Ha sido repetidas veces fotografiada y medida cuantitativamente con telescopios equipados para fotometría. La ola de oscurecimiento, según mediciones recientes efectuadas por el astrónomo griego J. H. Focas, del Observatorio de Atenas, avanza a una velocidad media de 35 kilómetros por día, que es un valor muy próximo al estimado para la velocidad de transporte del vapor de agua por la atmósfera y que hace presumir que ambos fenómenos guardan relación entre sí. La fuente de los informes de los cambios de color de Marte con las estaciones se debe a que en los cambios de estación es mayor el contraste.

⩽ Y ahora bien ¿cuál es el origen de la ola de oscurecimiento? Svante Arrhenius, el mismo a quien hemos visto atacando el dogma de Lowell, postuló una explicación inorgánica de la ola de oscurecimiento. Supuso que en las manchas oscuras de Marte (pero no en las brillantes) hay unas sales que cambian la tonalidad y color con la humedad. Las sustancias de esta clase general, como el cloruro de cobalto, son conocidas en la Tierra y, de hecho, se emplean para medir los cambios de humedad. La cantidad de agua liberada del casquete polar, si se distribuye por todo el planeta, es muy pequeña, de unos 10^{-3} g cm^{-2}, unos cuantos miles de veces menor que el contenido en vapor de agua de la atmósfera terrestre. En el frente móvil de la ola de oscurecimiento el contenido en vapor de agua puede ser 10 veces mayor, o sea de 10^{-2} g cm^{-2} y, en la Tierra, no se conoce ningún cuerpo que cambie su tonalidad (o color) de la forma que se observa en Marte por un incremento tan pequeño en la cantidad absoluta de humedad. Además, las sustancias cuyas propiedades de absorción son las causantes de la humedad –las denominadas sales higroscópicas– polarizan la luz que reflejan de modo que no concuerda con la polarización observada de la luz solar reflejada por Marte. Recordemos que las manchas brillantes están compuestas por limonita, que es un mineral muy duro y muy absorbente. Las manchas oscuras son todavía más oscuras y no pueden estar compuestas por sales semitransparentes.

⩽ Existe otra explicación de la ola de oscurecimiento. Marte parece ser un mundo árido y si en él existen organismos, podemos suponer que están muy adaptados a la disponibilidad de agua. Está más lejos del Sol que la Tierra y, en consecuencia, si tiene plantas fotosintéticas estarán más necesitadas de fotones que las nuestras. Observamos que cuando aumenta la humedad local, las manchas oscuras marcianas se hacen más oscuras. ¿Estamos quizá observando en realidad el desarrollo y proliferación vegetativo

estacional de Marte? La suposición es natural y fue postulada ya hace tiempo -en 1884- por el astrónomo francés E. L. Trouvelot, que razonó así:

> A juzgar por los cambios que he visto ocurren cada año en estas manchas, podría creerse que la variación de esas zonas grisáceas se debe a los cambios que experimenta la vegetación marciana según la estación.

⋞ La observación visual de la ola de oscurecimiento indica que los cambios de intensidad de los distintos núcleos oscuros ocurren en períodos característicamente tan cortos como una semana y cubren vastas regiones de Marte. El florear repentino de la vida vegetal, en extensas zonas de la Tierra es un proceso bastante común. La floración algácea es un ejemplo; otro, posiblemente más interesante, es el rápido crecimiento de la vegetación durante la estación anual de lluvias en muchos desiertos terrestres. Las figuras 20-2 y 20-3 ilustran los severos cambios que se producen en un campo dentro de un mes en el que aumenta el contenido de agua disponible del suelo. Si la ola de oscurecimiento es un fenómeno biológico, se desprende que la vida en Marte está esparcida y que, además, responde rápidamente a los ligeros cambios en el contenido de humedad local. ¡Qué conclusión tan extraordinaria sacada a más de setenta y cinco millones de kilómetros! Sin embargo, debemos recordar el legado de los canales. ¿Hemos considerado todas las posibilidades? ¿Es la actividad biológica marciana la única explicación razonable de la ola de oscurecimiento o hay alguna otra, de tipo inorgánico, que esté más cerca de la verdad y que hasta ahora se nos haya escapado?

⋞ Es probable que con la ola de oscurecimiento tenga relación la corona oscura que rodea al casquete de hielo polar en su movimiento de recesión hacia el polo. Dicha corona ha sido descrita como negra, parda o azul. Se trata de un verdadero fenómeno marciano y no de un efecto de contraste, como puede demostrarse enfocando sólo el casquete polar en el telescopio y observando que la corona sigue siendo mucho más oscura que las zonas circundantes. La polarización de la luz reflejada por la corona polar demuestra que ésta no se debe simplemente a la humectación del suelo marciano, sino que hay algo más.

⋞ En el limbo del casquete de hielo polar que recede hay probablemente un aporte de vapor de agua atmosférico mayor que en cualquier otra región de Marte. Existe incluso la simple posibilidad de temporales y someras charcas de agua líquida aunque no se haya podido confirmar nunca por polarimetría y parece razonable que los organismos de un planeta árido proliferen en el borde del casquete polar. A pesar de las bajas temperaturas medias de Marte, las temperaturas diurnas en verano en los núcleos oscuros cerca del casquete polar tienden a ser suaves, incluso comparadas con las terrestres y parece ser que el borde del casquete, en verano, es un lugar ideal para buscar vida en Marte.

⋞ Además de estas variaciones estacionales, Marte muestra cambios seculares sorprendentes. Si bien las regiones brillantes y las oscuras conservan





Figura 20-2. Vegetación de monte bajo en una región semidesértica en Jebel Sileitat, Jartum, Sudán, antes del inicio de la estación de lluvias. [Cortesía del Dr. M. J. Chadwick, Universidad de Cambridge. (Véase también Life in Deserts, de J. L. Cloudsley-Thompson y M. J. Chadwick, Dufour, Filadelfia, 1964.)]

Figura 20-3. La misma región de Jebel Sileitat de la figura 20-2, pero ahora en la estación de lluvias. Debido a caprichos de la reproducción en color, ni la hierba aparece tan verde ni el cielo tan azul como son en Jartum. [Cortesía del Dr. M. J. Chadwick, Universidad de Cambridge. (Véase también Life in Deserts, de J. L. Cloudsley-Thompson y M. J. Chadwick, Dufour, Filadelfia, 1964.)]

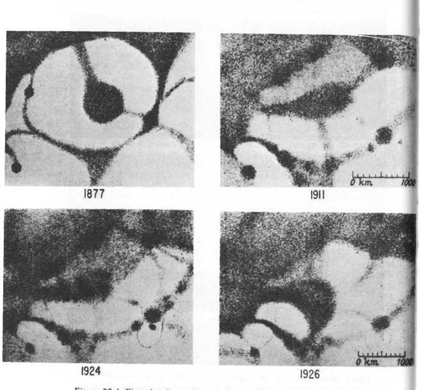


Figura 20-4. Ejemplos de cambios seculares en Marte. He aquí cuatro dibujos de la misma zona de Marte, la región de Solis Lacus. El dibujo de arriba a la izquierda, lo hizo Schiaparelli. Los tres restantes, hechos en 1911, 1924 y 1926, son de E. M. Antoniadi. Aun admitiendo las dificultades en la observación visual y las diferencias entre los estilos de dibujar de Schiaparelli y Antoniadi, resulta claro que hubo cambios topográficos sustanciales en la superficie marciana. (Reproducido de La Planète Mars, de E. –M. Antoniadi, Hermann et Cie, 1930.)

generalmente la integridad de sus configuraciones relativas durante muchas décadas, algunas zonas sufren cambios erráticos, rápidos, muy marcados. En la figura 20-4 vemos cuatro dibujos, tres de ellos del astrónomo griego Antoniadi. Los dos superiores son de 1877 y 1911; los inferiores, de 1924 y 1926. La región es Solis Lacus, en otro tiempo capital de Marte en la concepción del mundo lowelliano. A modo de ejemplo de la superioridad de las observaciones visuales a las fotográficas, compárense los dibujos de Antoniadi de Solis Lacus con la representación de la misma de la figura 19-4 (latitud 30° S, longitud 90°) sacada solamente de placas fotográficas. Las líneas de puntos de los dos dibujos inferiores encierran zonas cubiertas por nubes en el momento de la observación. Entre 1877 y 1911 algo extraordinario tuvo que haber ocurrido en Solis Lacus e incluso, en un período menor, entre 1924 y 1926. Por las escalas de los dibujos vemos que esos cambios fueron importantes. Abarcan zonas de 1000 km en un sentido. Tuvieron lugar grandes variaciones en los detalles generales. En un desierto aparecieron manchas oscuras; en otras partes, fueron los desiertos los que aparecieron en las manchas oscuras. ¿Qué sucede? Quizá los cambios seculares de Marte representan las sucesiones ecológicas. En la Tierra, debido a las condiciones variables geológicas y climáticas, a menudo una especie de organismo llega a una región previamente inhabitada y prolifera allí posiblemente en un período de tiempo relativamente corto. Otras veces, las condiciones climáticas pueden resultar tan severas, que la especie se extermina localmente.

⩽ La reaparición de manchas oscuras después de una tormenta de polvo, es posible que guarde relación con los cambios seculares. Observamos materia de los desiertos marcianos llevada por los vientos a las manchas oscuras, que en consecuencia se ocultan. La tormenta de polvo no se desplaza y sin embargo, al cabo de poco tiempo, casi siempre como una semana, reaparece la mancha oscura. ¿Adónde ha ido el polvo? ¿Ha crecido la vegetación marciana por el polvo en el corto período de una semana como ha supuesto el astrónomo estoniano-irlandés Ernst Öpic? ¿Se sacuden las plantas marcianas para quedar limpias? ¿O, hay alguna explicación inorgánica que tenga que ver con las diferentes actitudes?

⩽ En el capítulo 19 hicimos referencia a la identificación de limonita en las manchas brillantes de Marte, por los análisis de polarización de la luz solar que reflejan. La polarización de los desiertos marcianos es independiente de las estaciones marcianas; las curvas de polarización tienen la misma característica en el verano que en el invierno de Marte. Sin embargo, en las manchas oscuras, la polarización depende mucho de la época del año, siendo mucho más notable en la primavera local y a principios de verano, que a finales de otoño y en invierno. Para reproducir en laboratorio algo parecido a estos cambios con las estaciones, Dollfus tuvo que llegar a la conclusión de que las partículas de las manchas oscuras de Marte cambian periódicamente su oscuridad o su tamaño –o probablemente ambas cosas– con las estaciones. Ya hemos encontrado los cambios estacionales en la ola de oscurecimiento y

de las condiciones físicas de la misma antes de llegar al suelo, pero que no realice experimentos en éste; desde un artefacto que aterrice y realice unos cuantos experimentos de importancia biológica durante un corto tiempo y desde un laboratorio biológico mayor, automatizado, que lleve a cabo una amplia gama de investigaciones biológicas relacionadas entre sí durante un largo período. Cualquier estrategia de exploración marciana supondrá la combinación de estos sistemas. ≫ Un vehículo volante que lleve una cámara fotográfica automática puede explorar el suelo de Marte desde una distancia de varios miles de kilómetros y transmitir las imágenes ≪ lentamente, punto por punto, ≫ a la Tierra por televisión. El experimento del cohete lunar soviético Luna III, que fotografió el lado aculto de la Luna (capítulo 21, figuras 21-7 y 21-8), prueba la total viabilidad de un experimento así.

≪ Un vehículo americano contemporáneo típico es el Mariner IV que se muestra en la figura 20-5. Fue proyectado para tomar 22 fotografías de

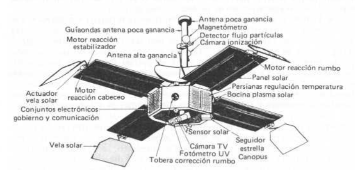
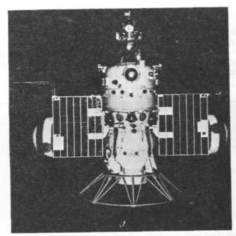
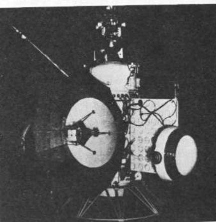


Figura 20-5. Croquis de la nave espacial estadounidense Mariner IV, que voló hacia Marte el 4 de julio de 1965. La mayor parte de los experimentos previstos fueron para medir partículas interplanetarias y campos magnéticos. El fotómetro ultravioleta fue un experimento que se eliminó antes del lanzamiento de la nave. (Cortesía de la NASA.)

Marte desde una distancia de unos pocos miles de kilómetros. La fotografía planetaria fue el único experimento marciano dirigido a la superficie de Marte desde el Mariner IV. En las figuras 20-6 y 20-7 aparece la infructuosa nave espacial soviética Marte I. Además del equipo de televisión, Marte I llevaba espectrómetros de infrarrojo y ultravioleta y un sistema para detectar la emisión de radio de onda larga. ≫ Las fotografías durante el tránsito nos permitirán estudiar detalles tan pequeños como de un kilómetro de superfi-





Figuras 20-6 y 20-7. Dos vistas de la nave espacial soviética Marte I, que se lanzó y viajó hacia Marte sin resultado el 1 de noviembre de 1963. Marte I tenía una cantidad de instrumentos mucho mayor y más complicada que la de Mariner IV, como se hace evidente comparando estas fotografías con la figura 20-3. La nave espacial soviética Zond 2 fue de proyecto parecido al de Marte I. (Cortesía de Soofoto, Moscú.)

cie. Podemos entonces estudiarla con el mismo detalle con que pueden los astrónomos, empleando los sistemas instalados en la Tierra, estudiar la superficie de la Luna. Una vez realizadas tales investigaciones, quedarán resueltos muchos de los problemas que conciernen a la naturaleza de las manchas oscuras de Marte y de los polémicos canales.

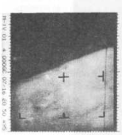




Figura 20-8. Tres transcripciones del encuadre 1 de la sucesión de fotografías de la superficie de Marte tomadas por el Mariner IV. Por encima del horizonte planetario se ve una posible nube en las dos últimas versiones. El centro de la fotografía corresponde aproximadamente a latitud 35°N y longitud 172°E, principalmente una zona desierta. (Cortesía de la NASA.)

⩽ El 14 de julio de 1965, la nave espacial Mariner IV, de los Estados Unidos, sobrevoló con éxito Marte efectuando diversas observaciones científicas. En un experimento elegante por su sencillez, la nave espacial voló por detrás de Marte y su señal de radio a la Tierra se fue eclipsando gradualmente debido a la atmósfera del planeta. A partir de la velocidad de desfallecimiento de las señales de radio, se obtuvo información sobre la temperatura y variación de la presión de la atmósfera marciana. Los experimentos encaminados a encontrar campos magnéticos planetarios y las zonas de radiación de Van Allen (5) asociadas, no dieron resultado. La ausencia de campo magnético en Marte reviste cierta importancia. Se cree que el campo magnético terrestre procede de su núcleo de hierro líquido, formado en el tiempo geológico por la migración hacia abajo del hierro de la superficie y del manto. La falta de campo magnético en Marte supone que el hierro de

5.- Radiaciones por partículas atómicas, como protones, debidas a los rayos cósmicos y la radiactividad del Sol, que se encuentran en el campo magnético terrestre a alturas comprendidas entre los 6000 y los 15000 metros.

ese planeta no ha hecho tal migración y que por tanto debe existir en cantidad todavía cerca de su superficie. Quizá sea ésta la explicación de la limonita y del óxido de hierro que parece haber en Marte.

⩽ El Mariner IV obtuvo con buen éxito unas catorce o quince fotografías de la superficie marciana del hemisferio iluminado, pero no sucedió lo mismo con las del lado opuesto. En la figura 20-8 vemos tres versiones del mismo primer encuadre de la secuencia fotográfica del Mariner. Las señales de radio desde Marte dieron, como la transmisión de fotografías por telefoto de los periódicos, información sobre la oscuridad de cada punto brillante u oscuro de la fotografía. Los números pueden luego traducirse a una representación e incrementar o disminuir a voluntad el contraste aparente de los rasgos de la superfice marciana. En la figura 20-8 aparecen tres elecciones diferentes de contraste. Entre los detalles brillantes y oscuros que vemos, hay una línea oscura curiosa que corre paralela al horizonte y cuya naturaleza se desconoce. En una de estas tres fotografías puede verse también una zona brillante sobre el horizonte, en el cielo. El si es una nube de polvo flotando en la atmósfera o un defecto óptico del sistema de lentes, es una cuestión que aún no se ha dilucidado.

⩽ La superficie cubierta por las fotografías de Mariner IV comprende principalmente los desiertos al oeste de Amazonis y finalmente regiones del área oscura de Mare Sirenum. (Véase la figura 19-4.) (6)

En las primeras fotografías de las manchas brillantes el Sol estaba casi en su culminación, las sombras eras cortas y los detalles difíciles de apreciar. En la figura 20-9, versión del encuadre 7, se pueden ver algunos detalles circulares. La figura 20-10 es una versión del encuadre 11 tomado cerca de Mare Sirenum cuando el Sol estaba bajo y proyectaba sombras largas. Está casi totalmente aclarado que las marcas circulares vistas anteriormente son cráteres como los de la Luna.

⩽ Los grandes cráteres lunares (véase el capítulo 21) están producidos, casi con certeza, por los choques contra la superficie de objetos de muchos kilómetros de tamaño. Se cree que la mayoría de estos objetos colisionantes son fragmentos de asteroides. errantes más o menos desencaminados en la parte interior del sistema solar. Como Marte está mucho más cerca que la Luna del grupo de los asteroides, tendrá que estar sometido a impactos mucho más importantes; quizá 25 veces mayores. Y sin embargo, el número de cráteres de un tamaño dado en una superficie determinada de Marte no es mayor que el número comparable en la Luna. Esto tiene que significar que en Marte existen procesos que verdaderamente erosionan hasta grandes cráteres de los impactos. En la figura 20-10 vemos un gran cráter, de más de

6.- N. del T. Mare Sirenum queda entre las latitudes −20° y −40° y longitudes 140° - 180°.

Figura 20-9. Transcripción del encuadre 7 de la secuencia fotográfica del Mariner IV. El Sol está en ese momento a 29° del zénit y empiezan a hacerse visibles los accidentes circulares. El centro de la fotografía corresponde aproximadamente a 13° de latitud Sur y 186° longitud Este, zona de desiertos principalmente. (Cortesía de la NASA.)

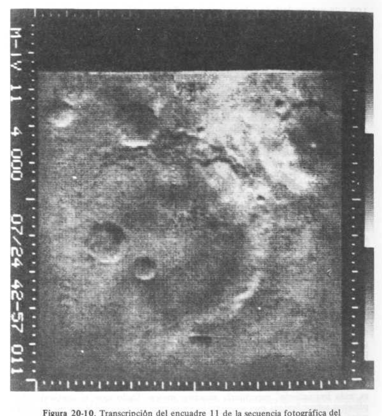


Figura 20-10. Transcripción del encuadre 11 de la secuencia fotográfica del Mariner IV. El Sol está en ese momento a 47° del zénit y se ven con claridad los cráteres de impactos. En las pendientes del norte del gran cráter central erosionado, se puede apreciar como un arroyo sinuoso; hay una línea recta que corta al sesgo las pendientes del Sur. El centro de la fotografía corresponde a aproximadamente 31° de latitud Sur y 197° de longitud Este, zona localizada en la región oscura. Es difícil comparar el contraste de los rasgos de este encuadre con los de otros. (Cortesía de la NASA.)

100 kilómetros de lado a lado cuyas pendientes están seriamente fracturadas y muy erosionadas. ¿Se debe la erosión a las tormentas de polvo o, acaso, como en la Tierra a la escorrentía del agua? Vemos que los cráteres en las regiones brillantes son más planos, están más erosionados y que sus fondos están más rellenos que los de las regiones oscuras. Esta es una circunstancia que se explica si tenemos presente que las regiones brillantes tienen probablemente grandes cantidades de polvo arrastrado por el viento que tiende a llenar y erosionar los cráteres que se forman allí.

≪ Es cierto que hoy día escasea el agua en la superficie de Marte, pero está fuera de toda duda que la erosión que produjo fue importante hace millones de años. A causa de la facultad para erosionar los cráteres – prescindiendo de cómo se realice – la superficie que vemos no es la del Marte de la antigüedad y no es por tanto posible saber por la geología marciana apreciada en las fotografías si hubo en otra época remota grandes masas de agua líquida. En algunas de las fotografías, como la del encuadre 11, figura 20-10, se pueden ver depresiones sinuosas que se parecen mucho a los caudales líquidos, sin que forzosamente tengan que estar producidas por el correr de las aguas. Aunque en la reproducción de la figura 20-10 no se ve fácilmente, hay una línea recta que se extiende desde el borde inferior izquierdo al centro a la derecha y que atraviesa el cráter grande erosionado, y que se aprecia en la fotografía original. El si esta peculiaridad tiene algo que ver con los clásicos canales marcianos o si es alguna otra cosa, tal como una falla, está todavía por resolver.

≪ La mejor resolución del suelo obtenida en las fotografías del Mariner IV fue a pocos kilómetros. En el capítulo 18 ya hemos visto que las fotografías del planeta Tierra con resolución equivalente no mostraron señales de vida, ni racional, ni de ninguna especie. Los experimentadores de la televisión del Mariner IV, Robert B. Leigthon, Bruce C. Murray y sus colaboradores, se han preocupado en poner de manifiesto que el experimento fotográfico del Mariner IV no se proyectó para buscar vida en Marte, y que no demuestra ni excluye la existencia de la misma en el planeta; ni resuelve tampoco la polémica de los canales. Ha demostrado la utilidad de la fotografía planetaria remota y la conveniencia de mejorar al máximo la resolución en las próximas misiones espaciales.

≪ Un objeto en órbita alrededor de Marte nos permite hacer acopio de información acerca de accidentes de Marte aun de menor tamaño y, lo que es más importante, recopilarla muchos meses. Dado que el conjunto de pruebas astronómicas que suscitan la existencia de vida en Marte es de tipo estacional, resultaría sumamente interesante examinar las manchas oscuras, por ejemplo, durante el paso de la ola de oscurecimiento. Quizá se obtendría información de la distribución de la materia orgánica en su superficie. Algunas moléculas orgánicas pueden estar presentes y ser propias de una mancha oscura y, otras, en otras manchas. Desde un objeto en órbita resultarían posibles las fotografías con una resolución de 10 metros e incluso aún mejores. Las observaciones de la Tierra con resolución semejante muestran

signos inequívocos de vida, aunque la mayoría son de habitación humana. Debido al hecho de que Marte es un planeta exterior, situado a mayor distancia del Sol que de la Tierra, nadie ha observado ninguna región de Marte en el curso de su noche local. Si la vida en Marte no está distribuida por todo él, sino localizada en algunos lugares de temperatura propicia con alto contenido de humedad, un satélite artificial podría ser el vehículo espacial ideal para hallar tales "puntos calientes". Las observaciones nocturnas con rayos infrarrojos detectarían fácilmente un punto caliente grande. Las posibilidades de exploración desde un satélite artificial en órbita alrededor de Marte son muchas y no hay duda de que se emplearán en las primeras fases de la investigación biológica de Marte.

≪ Pero mucho antes, necesitaremos colocar instrumentos científicos en el suelo de Marte. Además de la simple pregunta de si "hay vida en Marte", los biólogos están interesados en la anatomía, fisiología, genética, bioquímica, ecología y comportamiento de los organismos marcianos, por citar sólo unas cuantas disciplinas, cuya información no puede lograrse más que en el lugar. En el proyecto de la instrumentación para detectar y caracterizar la vida en Marte – ocupación principal hoy día de algunos biólogos – hay dos cuestiones fundamentales. Primera: ¿Hay vida en Marte por todas partes o está localizada sólo en unas pocas zonas? Segunda: ¿Qué relación guardan las formas de vida de Marte con las de la Tierra? ¿Puede aterrizar un laboratorio biológico automatizado en cualquier lugar de Marte o hay emplazamientos que convienen mucho más que otros? Hemos dado razonamientos de que algunos lugares, como el borde del casquete de hielo polar en recesión durante la primavera marciana, son hábitats favorables para los organismos marcianos. Otras zonas, como Syrtis Major y Solis Lacus, presentan contrastes estacionales o seculares. No obstante, los vientos marcianos tienen que distribuir organismos pequeños fundamentalmente de modo uniforme por toda la superficie del planeta y así vemos que hoy en la Tierra se pueden hallar microorganismos, en esencia, por todas partes; desde los desiertos del Sahara y de Gobi a la fosa de Mindanao; desde la cúspide del Everest a lo alto del Empire State Building. Los seres humanos no están distribuidos con tanta uniformidad y una expedición extraterrestre que nos llegase para indagar la vida indígena haría bien buscando microorganismos, pues hay más y son fáciles de pillar. Y con todo, que nosotros sepamos, todo inventario biológico de la Tierra considera los organismos mayores que los microbios.

≪ ¿Cómo, en realidad, detectará la vida en Marte un laboratorio biológico automatizado? Entre el conjunto de posibles experimentos que se siguen activamente, está el de dejar en Marte un medio nutricio, inoculado con muestras de aquel suelo y seguir los signos de crecimiento y reproducción. A medida que crezcan los microorganismos, aumentarán la turbidez del medio nutricio o cambiarán su acidez. También es posible que los microorganismos marcianos, como muchos organismos terrestres, incluido el del hombre, liberen dióxido de carbono en el proceso de metabolismo del

alimento llevado desde la Tierra. El experimento biológico marciano Gulliver que se presenta en la figura 20-11, es uno de esos monitores de CO_2. ¿Y qué pasa si a los marcianos no les gusta la comida que les mandamos? ¿Qué pasa si sus gustos son más exóticos? Se les inoculará el nutriente, pero los organis-

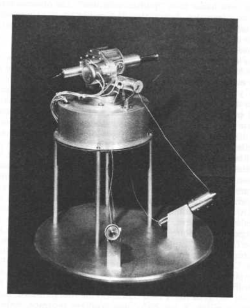


Figura 20-11. Modelo del Mark III Gulliver. Los dos proyectiles del disco son colectores de muestras. Al dispararse rastrearán un cordel largo pegajoso sobre la superficie de Marte, que cuando se recoja en el Gulliver, llevará adheridas muestras de la superficie marciana. Los cordeles se sumergen entonces en un caldo nutriente que contiene compuestos de carbono marcados radiactivamente. Si los microorganismos marcianos que se adhieran a los cordeles metabolizan el caldo marcado y liberan dióxido de carbono, se registraría este hecho y mandaría por radio a la Tierra. (Cortesía del Dr. Gilbert V. Levin, Hazelton, Laboratorios, Inc. y del Prof. Norman H. Horowitz, del Instituto Tecnológico de California.)



Figura 20-12. Vista recortada de un modelo de ensayo de Multivator. El polvo marciano entrará mediante un pequeño aspirador y se depositará en varias y distintas cámaras de reacción que cada una de ellas contiene su propia enzima o metabolito. Cada cámara es luego observada por un fotómetro para detectar los cambios en turbidez debidos al crecimiento de los organismos marcianos capturados, la fluorescencia por la presencia de enzimas, etc. (Cortesía del Prof. Joshua Lederberg y del Dr. Elliot Levinthal, de la Escuela de Medicina de la Universidad de Stanford.) El Prof. W. Vishniac, de la Universidad de Rochester, ideó un dispositivo parecido a éste, llamado Wolf Trap, que no se presenta aquí.

mos que estén presentes no crecerán; no habrá cambios de turbidez ni de acidez, ni se desprenderá CO_2. El experimento enviará resultados negativos a la Tierra. ¿Concluiremos que no hay vida en Marte?

≪ Otra posibilidad a experimentar es buscar categorías particulares de enzimas. Hemos visto que los compuestos del fósforo desempeñan un papel fundamental en la transferencia de energía metabólica y otras actividades metabólicas terrestres. Si el fósforo también es importante en el metabolismo marciano, cabe esperar que en su suelo, igual que en el de la Tierra, se encuentren las enzimas conocidas como fosfatasas, que transfieren los grupos del fósforo en el metabolismo. En la figura 20-12 se muestra un dispositivo denominado Multivator ideado para la búsqueda de la fosfatasa y de otros indicios de metabolismo marciano.

≪ ¿Y qué sucede si los organismos marcianos no contienen fosfatasas? El fósforo está presente en los organismos terrestres con mucha más abundancia que en la proporción cósmica. Quizá en Marte sean otros los átomos que suplen al fósforo. El método de la fluorescencia empleado para buscar fosfatasas dará resultados positivos falsos para algunos minerales relativamente raros. Quizá en Marte estén presentes esos minerales y el resultado positivo no indique en realidad la existencia de fosfatasas. Es por estas razones que se precisa de la combinación de diferentes ensayos experimentales en un laboratorio biológico automatizado para investigar a fondo y describir la vida de Marte. No hay un "detector de vida" simple.

≪ Como ejemplo de las ventajas que proporciona la combinación de métodos de experimentación, consideremos el siguiente dispositivo, que se halla en los Estados Unidos en su fase preliminar. Se hace que se adhieran electrostáticamente distintas partículas del suelo marciano a una cinta en movimiento que pasa por un espectrómetro de infrarrojo. Cada una de las partículas de 0,1 mm de diámetro y menores son analizadas automáticamente por espectroscopía infrarroja y si su espectro es característico de minerales, como lo será para la mayoría de las partículas, la cinta pasa a la partícula siguiente. Pero cuando se explore una partícula que tenga el espectro infrarrojo de materia orgánica, se retrata además a través de un microscopio. En principio, este ingenio puede examinar gran número de partículas sin interés para determinar algo acerca de la química y morfología de lo que consideramos partículas interesantes. Sólo los espectros y las fotografías de éstas serían transmitidos por radio a la Tierra. Si imaginamos ahora este procedimiento amplificado, con muchos dispositivos examinando muestras del suelo marciano para hallar sus propiedades físicas y químicas, sus posibles actividades metabólicas y sus respuestas a nuevos estímulos, veremos que un laboratorio biológico automatizado gobernado por un computador puede ser un instrumento muy poderoso en la búsqueda de vida en Marte.

≪ Para no descuidar del todo el gran riesgo y posibilidades de retorno, ese dispositivo debería obtener también panorámicas periódicas por televisión del suelo marciano. Un laboratorio de este tipo tendría que ser móvil

–podemos imaginar una especie de tanque pequeño. Es pesado, pero posible dentro del margen de carga útil a depositar en Marte por los potentes cohetes que se estudian en los Estados Unidos y en la Unión Soviética para la exploración tripulada de la Luna. Quizá las imágenes de televisión no fueran espectaculares –rocas, ríos de lava, dunas de arena. No sería una sorpresa de vez en cuando una planta depauperada. Pero existen otras posibilidades: fósiles, huellas, alminares, . . . Sólo lo sabremos cuando dejemos los instrumentos en la superficie de Marte. ≫

21

La Luna

Con los más pequeños telescopios de unos tres o cuatro pies se ha visto que la superficie de la Luna está matizada con largas cadenas de montañas, así como amplios valles, pues en las partes opuestas al Sol se pueden ver las sombras de las montañas y con frecuencia se descubren perfectamente los pequeños valles entre éstas, sobresaliendo en ellos quizá una o dos lomas. Kepler demostraría que por su exacta redondez son obra de seres racionales, pero yo no puedo compartir su opinión ni por su increíble grandeza ni porque muy fácilmente pueden estar formadas por causas naturales. Ni tampoco encuentro allí algo que se parezca al mar . . .

¿Es pues de creer que esa gran bola se hizo tan sólo para darnos un poco de luz por la noche o para aumentar las mareas del Mar?

Christiaan Huygens, *Nuevas conjeturas respecto a los mundos planetarios, sus habitantes y producciones.* (1670)

Aunque soy viejo en el errar,
Por valles y por colinas
Averiguaré donde ha ido
Y besaré sus labios y tomaré sus manos
Y caminaremos por rodales de hierba
Y arrancaremos en su época y cuantas salgan
las plateadas manzanas de la Luna,
las doradas manzanas del Sol.

William Butler Yeats, *The Song of the Wandering Aengus.*

≼ Cada uno de los nueve planetas, sus treinta y un satélites y los innumerables pequeños objetos de nuestro sistema solar tienen su propia particularidad. Aunque existen amplias relaciones, por ejemplo, dentro de los grupos planetarios terrestres y joviales, las diferencias son más sorprendentes. Para el explorador interplanetario del siglo que viene, las diferencias entre esos objetos serán más intensas que, por ejemplo, las diferencias entre los principales puertos de escala del siglo pasado. En éste y en las dos próximos capítulos, describiremos brevemente los entornos de esos diversos mundos - dentro de los más bien restringidos límites de nuestro saber actual - y los examinaremos por la posible presencia de vida.

≼ El vecino más próximo que tenemos es nuestro conocido satélite, la Luna. Gira alrededor de la Tierra, evidentemente, y tarda aproximadamente un mes en recorrer su órbita. Como desde nuestro lugar de observación en la Tierra vemos siempre aproximadamente la misma cara de la Luna, deducimos que debe girar alrededor de su eje a la misma velocidad que lo hace alrededor de la Tierra, para mantenerse así siempre enfrentada con la misma cara. Esta renuencia de la Luna a mostrarnos su trasero es una timidez que probablemente comparten los restantes treinta satélites de nuestro sistema solar. Ese sincronismo de rotación se debe a la fricción de las mareas, es decir, a las mareas producidas en el cuerpo del satélite por el planeta que tiene mucha más masa (1). Actuando durante los 4500 millones de años de la vida de nuestro sistema solar, han llegado a producir tal sincronismo. Sin embargo, una vez igualados los períodos de rotación y

1.- N. del T. Los autores se refieren a la teoría del rozamiento de Sir George Howard Darwin (naturalista, físico, astrónomo y matemático, hijo del naturalista Darwin, célebre por su teoría de la evolución). Según dicha teoría, cuando la Luna estaba todavía en estado fluido (e incandescente) durante su formación, su masa era atraída por la fuerza de la gravedad de la Tierra y deformada de modo análogo a como lo son nuestras aguas por las mareas. Como la deformación de su masa - la ola de masa - estaba siempre dirigida hacia la Tierra, cambiaba continuamente de posición respecto a la Luna debido al movimiento de rotación de ésta, o dicho de otro modo, su movimiento relativo era de avance en sentido contrario al de rotación de la Luna sobre su eje, ofreciendo una resistencia o fricción constante, que quedó equilibrada al llegar a "parar" la Luna, o sea, cuando su período de revolución se igualó con el de traslación.

Este mismo fenómeno se verifica en Mercurio y en Venus, pero en estos dos casos, la casi coincidencia del período de traslación con el de revolución, se debe al Sol, alrededor del cual describen sus órbitas.

traslación, las fuerzas de la marea no pueden seguir ya disminuyendo el período de rotación.

≮ A igual que la Tierra ha reducido la velocidad de rotación de la Luna, las mareas producidas por ésta en el cuerpo y océanos de la Tierra han reducido nuestra velocidad de rotación. Ese "freno" de marea aumenta la duración del día en 0,002 segundos por siglo, cantidad que si bien es increiblemente pequeña queda todavía dentro de los límites apreciables de los métodos astronómicos. En lo que lleva el hombre en la Tierra ese retardo de marea no ha producido un alargamiento perceptible del día, pero hace mil millones de años, si la velocidad de retardo se ha mantenido constante, el día debía ser de 2×10^{-5} s $año^{-1} \times 10^9$ años $= 2 \times 10^4$ segundos, o sea, aproximadamente seis horas más corto. La confirmación aparente de estas deducciones astronómicas del freno de las mareas de la Tierra ha llegado de una fuente inverosimil.

≮ En las Bahamas existe un arrecife de coral llamado *Aeropora palmata*, que ha levantado los escollos con su estructura esquelética, a razón de una capa por año, pero cuando estas capas se examinan con detalle, se halla que estan compuestas por grandes cantidades de marcas mucho más finas depositadas también por capas, aproximadamente unas 360 dentro del crecimiento anual. El geólogo americano John W. Wells, de la Universidad de Cornell, supone que esas finas capas representan el crecimiento diario del coral.

≮ Consideremos ahora una muestra del coral de época mucho más remota, como por ejemplo, del devónico superior (2), de hace unos 350 millones de años. La longitud del año no tiene que cambiar con el tiempo, pero si en aquella época el día era más corto que ahora, podría esperarse ver más capas finas por año en un fósil del devónico superior que en otro contemporáneo. Wells ha examinado esos fósiles y encontrado efectivamente que tienen unas 400 capas por año. Así, hace 350 millones de años, el año tenía unos 400 días y cada uno de estos era de (365/400) × 24 horas; aproximadamente 21,9 horas de duración, lo cual coincide con la asignación de los datos astronómicos al día del devónico superior. Este es uno de los muchos casos de relación entre la astronomía y la biología. Verdaderamente, este libro está dedicado a examinar esta relación.

≮ Todo el mundo sabe que vista a través de un pequeño telescopio la Luna es algo como lo que se ve en la figura 21-1. Tiene partes brillantes y partes oscuras, las llamadas *continentes* y *maria*, denominaciones que datan de la época en que las descubrió Galileo, que creyó que las manchas oscuras eran efectivamente masas de agua. Sabemos ahora que en la superficie de la Luna no hay agua en absoluto y que los *maria* son depresiones oscuras, relativamente llanas.

2.- N. del T. Período paleozoico entre el silúrico y el carbonífero, que se divide en superior (345 - 365 millones de años) e inferior (395 - 405 millones de años). En este período aparecieron los anfibios, primeros vertebrados.

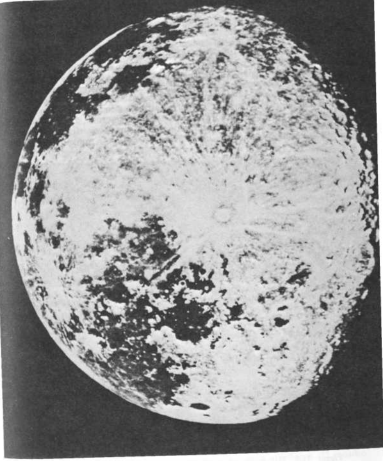


Figura 21-1. Rectificación de una fotografía de luna llena que muestra el cráter rayado Tycho en el centro del disco. (Cortesía del Dr. Ewan Whittaker y del Dr. G. P. Kuiper, del Laboratorio Lunar y Planetario de la Universidad de Arizona.)

≤ Para estudiar con más precisión las manchas brillantes y las oscuras se han empleado nuevos métodos fotográficos. Se proyecta la fotografía de la Luna sobre un globo en blanco y se reproduce desde el ángulo que convenga. Este procedimiento, denominado rectificación, elimina los efectos del escorzo (perspectiva) cerca de los bordes o limbo de la Luna. La fotografía rectificada de la figura 21-1, es pues una vista de la Luna que todavía no ha contemplado ningún humano. En el centro aparece el gran cráter lunar Tycho con radiaciones, que de ordinario se ve bastante al sur en las observaciones a simple vista o en las fotografías astronómicas. Puede verse cómo emanan los rayos brillantes de Tycho y atraviesan enormes distancias de la superficie lunar. La figura 21-1 está deducida de una fotografía tomada con luna llena - cuando la Luna, el observador y el Sol están aproximadamente

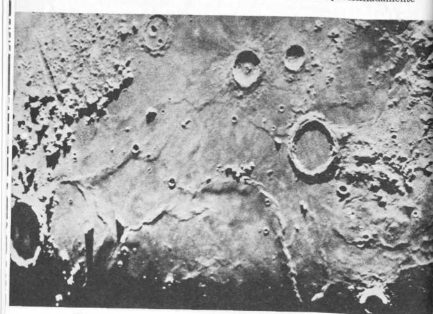


Figura 21-2. Fotografía sin rectificar de la región de Mare Imbrium. (Fotografía del Observatorio de Yerkes, por cortesía del Dr. G. P. Kuiper, del Laboratorio Lunar y Planetario de la Universidad de Arizona.)

en línea recta, con el observador en medio (en oposición). Durante la luna llena, la superficie presenta el gran contraste que se ve en la figura 21-1 y los radios de los cráteres como el Tycho destacan entonces mucho.

≤ Sin embargo, en otros momentos, como en los cuartos, cuando la luz del Sol incide en el centro del disco lunar desde cierto ángulo, una zona dada de la Luna parece mucho menos brillante, disminuye el contraste entre maria y continente y los rayos poco menos que desaparecen. En otras fotografías de la Luna, Tycho, aparte de sus rayos, es en realidad un cráter muy modesto y poco sobresaliente.

≤ En la figura 21-2 se reproduce una fotografía de una región menor de la Luna que es más conocida. Es una fotografía sin rectificar de la región de Mare Imbrium, un gran *mare* circular del cuadrante noroeste. Vimos que los suelos de los *mare* son toscos y que de vez en cuando presentan hoyos de cráteres de todos los tamaños. Hacia el borde inferior de la fotografía está el terminador lunar, lugar geométrico de los lugares de la superficie en los que acaba de ponerse el Sol. En el atardecer lunar, se alargan las sombras de las montañas, como en el borde inferior de la fotografía, a la izquierda, y por la longitud de esas sombras se puede calcular la altura de los accidentes que los provocan. De esta forma se ha determinado que hay enormes montañas en la Luna, algunas de ellas de la altura del Himalaya y quizá superiores. Las montañas del vértice superior izquierdo de la figura se denominan los Alpes, como contrapartida a los terrestres. El corte en los Alpes que va hacia el vértice izquierdo se llama Valle Alpino y su observación detenida revela que está lleno de cráteres muy poco espaciados, a diferencia de los valles clásicos que conocemos en la Tierra.

≤ Con la nave espacial estadounidense Ranger se obtuvo una resolución mucho mayor de la Luna; en la figura 21-3 aparece una fotografía típica obtenida por el Ranger VII. El denso conglomerado de cráteres en esta fotografía está a lo largo de un rayo lunar, mientras que en la del Valle Alpino están ordenados a lo largo del corte de los Alpes. Muchos de los cráteres lunares, como Arquímedes, el grande hacia el centro de la fotografía 21-2 están mejor descritos como paredes anulares o llanuras circundadas por una pared. Como el radio de la Luna es tan pequeño, el horizonte lunar está mucho más cerca del observador que el horizonte terrestre. Para una persona puesta en pie en el centro de un cráter lunar o llanura circundada grande las paredes le quedan fuera del alcance de la vista, más allá del horizonte.

≤ La relación entre la profundidad y el ancho de los cráteres de la Luna sigue la misma ley matemática que los cráteres de impacto de todos los tamaños en la Tierra. Esta y otras pruebas han convencido a la mayoría de astrónomos de que los grandes cráteres lunares se han formado por impacto de objetos procedentes del espacio interplanetario.

≤ El otro punto de vista es que son de origen volcánico. El estudio de las fotos próximas a la Luna obtenidas por la serie Ranger de naves espaciales, ha convencido a muchos astrónomos lunares de que los cráteres

Figura 21-3. Fotografía del Ranger VII de un conglomerado de cráteres en el suelo del recién llamado Mare Cognitum. (Cortesía de la NASA.)

pequeños - principalmente los que son demasiado pequeños para ser vistos desde la Tierra - pueden ser, en parte, de origen volcánico. Una de las pruebas de esta opinión se puede ver en la figura 21-4, que es una fotografía de cerca

Figura 21-4. Fotografía del Ranger IX del borde oriental del suelo del cráter lunar Alphonsus. La fotografía se tomó desde una altura de 175 kilómetros sobre la superficie, 1 minuto y 17 segundos antes del instante del impacto. (Cortesía de la NASA.)

del cráter lunar Alphonsus. La mancha oscura del centro y hacia abajo es el suelo del cráter, en el cual vemos una serie de arroyuelos o hendiduras que serpentean ligeramente la superficie lunar. Orientada según una de estas hendiduras hay una secuencia de por lo menos seis cráteres de tamaño bastante regular. Esta correlación entre los arroyuelos y los cráteres es demasiado notable para poderla atribuir a mera casualidad. O los cráteres han ocasionado los arroyuelos, o los arroyuelos los cráteres o los dos proceden de una misma causa. Se ha dicho que lo más probable de las tres cosas es que tanto los arroyuelos como los cráteres volcánicos estén formados a lo largo de fallas por tensiones en la superficie lunar. En algunos casos se han observado largas cadenas de cráteres que están demasiado ordenadas para ser la configuración accidental resultante de los impactos de los proyectiles del espacio interplanetario. (Sin embargo, en la vecindad de los cráteres radiados, la acumulación de cráteres a lo largo de los rayos puede que sea el resultado de la colada de lava arrojada por la explosión que formó el cráter.)

⩽ Algunos *maria* - quizá todos - muestran una forma más o menos circular. La figura 21-5 es una fotografía rectificada de Mare Homorum, en el cuadrante sudoeste del hemisferio lunar orientado hacia la Tierra. El *maria* quizá en realidad, no sea más que un grupo de cráteres muy grandes, producido exactamente por el mismo mecanismo de impacto que produjo los cráteres. El Valle Alpino sería entonces exactamente análogo a un rayo lunar, una cuchillada grabada en los Alpes lunares por las proyecciones del impacto gigante que formó Mare Ibrium.

⩽ Si los cráteres lunares están formados por el impacto de grandes meteoritos y objetos del tamaño de asteroides, ¿no tendríamos ocasión de ver cómo se formaba uno? ¿Dedican los astrónomos parte de su tiempo a comparar fotografías de una misma región de la Luna tomadas en distintos años para ver si aparecen nuevos cráteres? Nos podemos convencer fácilmente de que tal empresa carece de utilidad. En el hemisferio visible de la Luna, - en la cara que nos da - se ven como unos 10^5 cráteres, en las fotografías tomadas con potentes instrumentos astronómicos. Suponiendo que se hayan formado uniformemente a lo largo de los 5 mil millones de años de historia de la Luna, llegamos al resultado de que se forma uno cada $(5 \times 10^9)/10^5 = 5 \times 10^4 = 50000$ años. En promedio, tendríamos que esperar unos 50000 años antes de ver la formación del próximo cráter y aun así, probablemente, no tendría nada de particular.

⩽ En la Tierra y en el mismo período de 5×10^9 años tienen que haber ocurrido impactos semejantes y, sin embargo, no está tan grabada con grandes cráteres circulares. La discrepancia se comprende perfectamente en razón de la erosión del viento y de las aguas de nuestra superficie. En la Tierra y en períodos de tiempo muy breves comparados con la historia del planeta, se erosionan las estructuras. De hecho, en los últimos años, se han reconocido como cráteres fósiles de impacto de meteoro, estructuras tales como Riss Kessel, de Alemania. El número de estos cráteres recientes en la

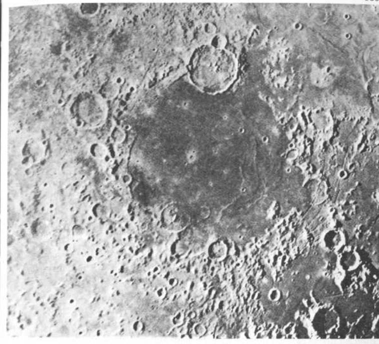


Figura 21-5. Rectificación de una fotografía del Observatorio de Meudon, de Mare Humorum. En la periferia de Mare Humorum obsérvense los cráteres circulares parcialmente destruidos. (Cortesía del Dr. G. P. Kuiper, del Laboratorio Lunar y Planetario, de la Universidad de Arizona.)

Tierra, extrapolados a lo largo de la historia, da un total que está en completo acuerdo con el de *maria* en la Luna.

⩽ ¿Por qué algunos cráteres, como Tycho, presentan rayos radiales y otros, como Arquímedes, no, si ambos tipos se formaron por el mismo proceso de colisión contra la Luna de algún "derrelicto" interplanetario? Hay ahora razón para creer que en la superficie lunar se produce erosión, tanto por el impacto de innumerables micrometeoritos diarios, como por el reimpacto sobre la Luna de material propio proyectado después de las colisiones de los grandes objetos. En la figura 21-5 pueden verse algunos signos

de esa erosión. En Mare Humorum y su alrededor hay varios cráteres "fantasma", formas circulares que, evidentemente, fueron una vez cráteres y que están parcialmente destruidos por la erosión. También es posible que las lenguas de lava alcanzaran al menos algunos de los primeros y mayores impactos lunares, oscureciendo así la fisonomía preexistente.

⩽ Otras causas de erosión son la radiación y el viento solares. Cuando los materiales son bombardeados por la radiación ultravioleta solar y por rayos X y sus partículas cargadas son proyectadas por viento protónico solar, sus estructuras cristalinas tienden a romperse; la recombinación de estos fragmentos moleculares forma grupos químicos que imparten color a los objetos y el sobrante es un polvo fino, muy oscuro. Las investigaciones espectroscópicas no han logrado hallar ningún signo de atmósfera lunar. Cuando una radiofuente cósmica como la Nebulosa del Cangrejo pasa por detrás de la Luna deja de "centellear" instantáneamente en vez de amortiguarse poco a poco como sudecería si la Luna tuviera tan sólo una modesta atmósfera. Es especialmente en ausencia de atmósfera que las moléculas tienden a sinterizarse, es decir, a soldarse unas con otras; no rígidamente, sino más bien con sólo uno o dos puntos de contacto, dando por resultado un cuerpo ahuecado muy poroso, muy poco denso y de gran complejidad, que se ha denominado de "estructura de castillo de hadas". Tal material explica muchas de las propiedades espectroscópicas, polarimétricas y radio de la superficie lunar.

Aunque se sabe que la superficie de la Luna está cubierta por este material de tan poca densidad, todavía se especula sobre la profundidad de la capa. La mayoría de los astrónomos creen que su espesor es del orden de unos pocos centímetros o menos, Thomas Gold cree que puede ser de kilómetros.

⩽ Cuando un pequeño asteroide, digamos, por ejemplo, choca contra la Luna, hace volar fragmentos de la superficie algunos de los cuales se escapan al espacio y los restantes se esparcen de nuevo, produciendo los mayores cráteres secundarios al caer. El material del asteroide y el del lugar del impacto quedan ambos triturados a polvo rocoso, que cuando se distribuye por el paisaje lunar da la sensación de rayos. Con el paso del tiempo, la asolación de la radiación solar y del viento protónico solar origina el deterioro progresivo del brillo de los rayos. Al cabo de unos 10^6 años se habrá destruido la propiedad altamente reflectante del material de los rayos y, excepto por los cráteres secundarios, no habrá señales de su existencia previa. Puede ser que los cráteres con rayos, como Tycho, no tengan muchos millones de años.

⩽ Ya hemos hecho alusión a los experimentos de laboratorio en los que se irradiaron con protones polvos finos en el vacío simulando el viento protónico solar. En los experimentos de esta clase, realizados por el astrónomo americano Bruce Hapke, de la Universidad de Cornell, se vio que casi con independencia de la composición del material irradiado, el polvo se hace tan oscuro como lo es hoy la superficie de la Luna después de la



Figura 21-6. Ultimos tres encuadres de la cámara fotográfica P_1 de la nave espacial Ranger IX. El último se tomó 0,45 segundos antes del impacto desde una altura aproximada de 1 kilómetro a la superficie. (Cortesía de la NASA.)

irradiación protónica solar equivalente de 10^6 años. La irradiación continuada tiende a hacer que los materiales sean todavía más oscuros. Así, para explicar el hecho de que la Luna no sea más oscura de lo que es, tenemos que postular que el material coloreado brillante subyacente aflora por movimiento, a escala de tiempos de millones de años o menos. Esto está claramente en relación con el proceso de erosión que ya hemos mencionado.

⩽ Tenemos pues un modelo interesante de las capas superficiales del suelo lunar. Quizá sólo unos centímetros por debajo del material pulverizado, oscuro, irradiado y sinterizado, haya una capa de material sinterizado más brillante que no haya estado expuesta últimamente al viento protónico solar.

⩽ El efecto oscurecedor de la radiación solar no es, evidentemente, exclusivo de la Luna; es de aplicación a todos los cuerpos del sistema solar con carencia de atmósfera o que la tienen muy enrarecida y con campos magnéticos pequeños (por lo que los protones del Sol llegan a sus superficies). En esta categoría están probablemente la mayoría de los satélites del sistema solar, quizá el planeta Mercurio y el polvo y meteoritos que llenan los espacios entre los planetas. Las vastas sendas de polvo que cubren el plano del sistema solar y que vemos como luz zodiacal, están compuestas de partículas muy oscuras, oscurecidas sin duda por los protones solares.

⩽ La erosión de la superficie lunar tiende a barrer los cráteres pequeños en períodos cortos de tiempo comparados con la edad de la Luna, pero no puede destruir los cráteres grandes. Dado que hay más impactos de partículas pequeñas que de partículas grandes, tendrá que haber más cráteres pequeños que grandes. El resultado combinado de impacto y erosión tiene que producir cierta distribución del tamaño de los cráteres en la superficie lunar. Se han estudiado los cráteres de las fotografías de los Ranger para reconstruir la historia de la formación y destrucción de los cráteres lunares.

⩽ Una de las conclusiones más notables de las fotografías de los Ranger es la uniformidad general de la superficie lunar. La figura 21-6 es una fotografía tomada por el Ranger IX del cráter Alphonsus. El circulito blanco

Figura 21-7. Composición con fotografías del Luna III del lado oculto de la Luna. (Cortesía del Dr. Ewen A. Whittaker, del Laboratorio Lunar y Planetario, de la Universidad de Arizona.)

es el lugar de impacto de la nave espacial Ranger IX al borde de un pequeño cráter. Las partes 1, 2 y 3 de dicha fotografía se tomaron una tras otra con más resolución cada vez. Así, el cráter junto a donde tuvo lugar el impacto, apenas es visible en la parte 1, mientras que en la 3 se distingue claramente. Lo que resulta curioso es la similitud en la forma de los cráteres de muy distintos tamaños y la uniformidad general del paisaje a diferentes resoluciones. Los cráteres más grandes de las partes 1 y 3 (en la misma figura 21-6) son prácticamente indistinguibles y, en cambio, uno es diez veces mayor que el otro. En las mejores fotografías del Ranger IX se pudieron apreciar detalles hasta de centímetros, pero a pesar de ello y al revés que con la Tierra, no aparecieron novedades cualitarivas en la superficie lunar cuando se aumentó la capacidad para ver pequeños detalles. La nave espacial soviética Luna IX, que alunizó felizmente, reveló un paisaje notablemente semejante en su carácter general al visto desde la Tierra con telescopios de incomparablemente peor poder de resolución.

≪ Observando los cráteres que parcialmente han destruido a otros y contando el número de fragmentos de asteroides en la vecindad de la Luna, los astrónomos han podido reconstruir algo de la historia de la formación de los cráteres lunares. Los que están dentro de los *maria* pueden atribuirse al impacto de fragmentos de asteroides en los últimos mil millones de años. Los *maria* lunares tuvieron que haberse formado antes, probablemente hace tres mil a cuatro mil millones de años. En los *continentes* lunares hay demasiados cráteres para atribuirlos a la frecuencia de impactos contemporáneos. Además, son necesarios objetos enormes - de muchos kilómetros - para producir en la cara de la Luna cicatrices tan grandes y duraderas como los *maria*. Así pues, muchos de los accidentes lunares tienen que deberse al impacto de meteoritos existentes en sus proximidades poco después de su origen. Y es posible que tales meteoritos fueran los fragmentos finales del enjambre de cuerpos que se condensaron por gravedad para formar la Luna. ≫

≪ La figura 21-7 es un montaje preparado por el selenólogo angloamericano E. A. Whittaker, del laboratorio lunar y planetario de la Universidad de Arizona. Está hecho principalmente a base de las fotografías de la cara oculta de la Luna tomadas por el cohete cósmico soviético Luna III cuando tal hemisferio recibía de lleno de luz del Sol. (El otro hemisferio, el que nosotros vemos, estaba por tanto oscuro, en la fase que llamamos luna nueva. Existe la desafortunada costumbre a llamar el hemisferio oculto, "lado oscuro" de la Luna que, como es natural, es un error, relacionado probablemente con la creencia inconsciente de algunos de que si la Tierra no es el centro del universo, es al menos fuente de toda luz.)

≪ El gran *mare* circular a la izquierda del centro, es Mare Crisium y, una vez rectificado, es idéntico a como se ve desde la Tierra. Excepto alrededor del limbo en el que hay solapamiento respecto a como se ve desde la Tierra, todos los accidentes son nuevos, descubiertos por el Luna III. En la figura 21-8 puede verse una fotografía rectificada y recentrada de la región



Figura 21-8. Fotografía rectificada y recentrada de la región de la Luna observable desde la superficie de la Tierra y también observada por la nave espacial soviética Luna III. Esta figura y la parte izquierda de la anterior corresponden a la misma región de la Luna, fotografiada en condiciones de iluminación comparables. (Cortesía del Dr. Ewen A. Whittaker, del Laboratorio Lunar y Planetario, de la Universidad de Arizona.)

solapada - la fotografiada por el Luna III y por los telescopios terrestres. La comparación de las figuras 21-7 y 21-8 muestra la calidad de las fotografías del Luna III y da una buena idea de la relación entre los rasgos de la superficie lunar recién descubiertos y los ya conocidos de antes. Parece haber una falta enigmática de *maria* en la parte oculta de la Luna, que es un hecho que se relaciona con las cuestiones por resolver sobre su origen.

⪡ Las cicatrices y picaduras de la cara de la Luna es un tesoro hallado de indicios de la historia primitiva del sistema solar. Como no hay erosión eólica ni hídrica, los rasgos bajo su superficie han permanecido relativamente sin cambios. La erosión que allí existe, debida a micrometeoritos, impactos de meteoritos secundarios y al viento protónico solar, actúa muy lentamente

y no puede perturbar hasta grandes profundidades el subsuelo lunar. Existe pues la posibilidad de que cuando cavemos encontremos objetos intactos de edades cada vez más primitivas hasta que lleguemos al material formado esencialmente en el momento del origen del sistema solar.

⪡ En los capítulos 16 y 17 hablábamos de que el origen de la vida resultaba de la producción de moléculas orgánicas en una atmósfera reductora secundaria de gases emanados de la Tierra primitiva. A la Luna le tuvo que acompañar en sus principios una atmósfera semejante formada por sus propios gases, pero hoy carece en esencia de atmósfera y su masa es tan pequeña que por gravedad no puede atraer hacia sí ni a los gases más pesados. En su lugar se disipan al espacio por el proceso de escape gravitacional. En los tiempos primitivos el escape atmosférico tuvo que haber sido igual de eficaz en la Luna. Así pues, podría haber retenido una atmósfera durante, digamos por ejemplo, 10^9 años solamente si el vacío de los gases que escapaban al espacio se iba rellenando con los emanados de su interior. Existen ciertas razones para creer que esas emanaciones existieron y que la Luna pudo retener una atmósfera - e incluso hidrosfera - en sus épocas remotas. De ser así, tuvieron que producirse cantidades apreciables de moléculas orgánicas abiológicas y si en la Luna nunca hubo vida, tal material tiene que estar ahora secuestrado por debajo de la capa de materia micrometeorítica que caía entonces lentamente atravesando la antigua atmósfera lunar.

⪡ No sabemos cuanto tiempo retuvo la Luna su atmósfera e hidrosfera. Parece posible, aunque no probable, que surgiera alguna forma primitiva de vida en los principios de la Luna, que ciertamente no podría sobrevivir hoy. Las condiciones de la Luna, que son mucho más rigurosas que las de Marte, matarían a cualquier organismo terrestre que se colocara sin protección en su superficie. Durante el día lunar (uno de nuestros meses), las temperaturas de su superficie varían desde el punto de ebullición normal del agua a −180° C. No hay atmósfera ni agua líquida. La radiación ultravioleta del Sol es adecuada por si sola para destruir en cuestión de horas al microorganismo más resistente a la radiación que se conozca. La acción conjunta de los rayos X y del viento protónico solares carbonizarían en unos años hasta la materia orgánica muerta.

⪡ De vez en cuando se ha postulado la posibilidad de vida en la Luna basándose en los cambios de color y en otros cambios que se han registrado. Por ejemplo, el astrónomo americano William H. Pickering, observando en Mandeville, Jamaica, en las décadas de los años 1920 y 1930, registró muchas observaciones de cambios de color periódicos en los suelos de los cráteres acordes con la hora local del día selenita. Observó por ejemplo, que el suelo del cráter Stevinus se hacía pardo-rojizo cuando el Sol al salir ascendía en el cielo lunar, mientras que el del gran cráter Grimaldi se hacía cada vez más verde hacia el mediodía local. También dijo Pickering haber visto puntos que se movían en el suelo de los cráteres y que unos eran brillantes y otros oscuros; atribuyó el movimiento de los brillantes a nubes en la casi sin aire

Luna y el de los puntos oscuros al rápido crecimiento de plantas por el suelo e incluso, en algunos casos, ¡al movimiento de grandes insectos migratorios!

⩽ Observaciones semejantes se han hecho hasta hace muy poco, aunque las interpretaciones han sido cada vez menos fáciles. Muchos de los resultados se pueden atribuir a las condiciones de visibilidad en la atmósfera terrestre, a la dependencia del poder reflectante de la superficie lunar según la altura del Sol y al movimiento de las sombras en el suelo de los cráteres cuando el Sol está bajo. No hay ninguna buena prueba de vida en la superficie de la Luna y, evidentemente, las condiciones físicas que allí reinan son un potente argumento independiente contrario a la biología de la superficie lunar. ¿Pero no podrían ser menos inclementes las condiciones debajo de la superficie?

⩽ La Luna, como cualquier otro objeto del sistema solar, es una fuente de radiación de radioondas. Cuanto más intensa sea la radiación radio, más caliente tiene que estar. A longitudes de radioonda cortas, los radiotelescopios "ven" de cerca la superficie lunar y deducen una temperatura próxima a la determinada por el método del infrarrojo y, por otros medios los valores que ya se han citado. Pero cuando pasamos a radiotelescopios sintonizados a longitudes de onda cada vez más largas, observamos, en efecto, la Luna a profundidades cada vez mayores. El astrónomo soviético V. I. Troitskii, de la Universidad de Gorkii, halla un aumento sistemático de esta "temperatura de color" deducida de la longitud de onda, que corresponde a un incremento de la temperatura de unos 1,6°C por metro y la fuente de este aumento tiene que ser el calor de su interior. En la Tierra, según se ha comprobado en perforaciones y en pozos, la temperatura de la superficie aumenta análogamente. (3)

⩽ Además del aumento de la temperatura media con la profundidad, las variaciones diarias también se reducen mucho cuando profundizamos en la superficie lunar, debido a las excelentes propiedades aislantes del material superficial. Las partículas de la estructura del "castillo de hadas" tienen entre sí pocos puntos de contacto y, por tanto, es difícil se propague hacia abajo el calor del Sol. A una profundidad de unos 50 metros, son de esperar temperaturas cómodas para nuestras normas de vida; temperaturas que, por otra parte, se mantienen constantes a lo largo del día y de la noche lunares. Algunos astrónomos y geólogos han sugerido que a esas profundidades tiene que haber agua subterránea incapaz de aflorar y desaparecer en la superficie por tener encima una capa de hielo, en exacta analogía al permafrost de las regiones antárticas terrestres. Si debajo de la superficie lunar existe una región que tiene temperaturas cálidas, agua líquida y la posibilidad de materia orgánica, es entonces prematuro excluir la posibilidad de vida en la Luna. La vida indígena parece muy inverosímil porque no hay

3.- N. del T. Pero a razón, en promedio, de 1°C cada 30 m. Esta profundidad se denomina gradiente geotérmico medio.

fuente de energía, además de la energía química encerrada en la materia orgánica y en otras subsuperficiales. En el mejor de los casos, esta energía está limitada y si alguna vez hubo vida a esas profundidades tuvo que morir por desnutrición en muy poco tiempo a escala de tiempo astronómico. Pero la subsuperficie lunar parece que efectivamente puede soportar microorganismos terrestres, hecho que es la base que concierne a la contaminación biológica de la Luna.

⩽ A principios de 1966 llegaron a la Luna hasta doce vehículos: las naves soviéticas Luna II, IV a IX y las estadounidenses Ranger IV, VI, VII, VIII y IX. Aunque se pretendió esterilizar el Luna II y el Ranger IV, no parece que fuera una esterilización perfecta la de ninguno de estos vehículos. Las dificultades del procedimiento de esterilización hubieran dificultado el progreso de los programas espaciales y, en consecuencia, se hicieron menos rígidos los requisitos de esterilización. Por fortuna, el riesgo no fue ni mucho menos tan grave como hubiera sido la posibilidad de contaminar biológicamente Marte, pues si bien no tenemos ninguna prueba que apoye la vida en la Luna, sí las tenemos en favor de la vida en Marte, como vimos en el capítulo 20. Si los microorganismos terrestres tienen que replicarse en la Luna, tienen que hallar la forma de enterrarse unos diez metros bajo la superficie lunar. Además, mientras que en Marte hay un mecanismo para la distribución de los contaminantes replicativos por dispersión atmosférica, en la Luna no existe nada semejante.

⩽ Sin embargo, puede haber pruebas directas de materia orgánica lunar subsuperficial. De vez en cuando se ha informado de nubes de gas, neblinas y resplandores rojizos vistos en la superficie lunar. El primero que aparece de tales informes es el de Sir William Herschel (descubridor del planeta Urano), en los siguientes términos:

> 4 de mayo de 1873. Percibí en la parte oscura de la Luna una mancha luminosa. Tenía el aspecto de una estrella roja como de cuarta magnitud. Estaba situada en el lugar de Hevelli Mons Porphyrites (accidente al que hoy llamamos cráter Aristarchus). El instrumento con el que la vi era un reflector newtoniano de 10 pies, con abertura de 9". La esposa del doctor Lind miró por el telescopio y la vio inmediatamente, aunque nadie se lo había dicho, y la comparó con una estrella . . .
>
> * * *
>
> Anoche tuve ocasión de contemplar la Luna en condiciones favorables y encontré que el volcán que vi en erupción el mes pasado estaba todavía muy luminoso. El cráter parecía resplandecer con un brillo que no sabría describirlo si no lo hubiese visto en erupción el mes pasado. Me pareció como si el cráter hubiera casi duplicado su tamaño desde entonces . . .
>
> * * *
>
> Esto es cuanto puedo decirle hasta el presente. Créame, señor, no tengo el menor deseo de guardarme tal observación, pero tengo tantos asuntos entre manos (que creo son de mayores consecuencias para la astronomía), que había pospuesto el darle cuenta de ellos en otra oportunidad.

Resplandores del todo análogos fueron vistos en Aristarchus, en 1963, por los astrónomos americanos Edward Barr y James Greenacre en el observatorio Lowell de Flangstaff, Arizona, que fueron confirmados por varios otros observadores con otro telescopio.

≪ El cráter lunar Alphonsus había sido ya objeto de informes de nubes de gas bajas o nieblas a ras del suelo que oscurecían los detalles de la superficie, antes de que el astrónomo soviético N. A. Kozyrev realizase una notable observación de la Luna el 3 de noviembre de 1958 en el Observatorio Astrofísico de Crimea. Mientras fotografiaba el espectro de la luz solar reflejada en Alphonsus, observó Kozyrev una nube rojiza que envolvía la cima central del cráter. (En la figura 21-9 se ve una fotografía de Alphonsus tomada por el Ranger IX. Es el cráter más grande; queda en la parte izquierda de la fotografía. También puede verse el pico de su montaña central. La figura 21-4 es una vista de cerca del suelo de Alphonsus.) Inmediatamente obtuvo otro espectro y como media hora más tarde observó que la nube se había disipado y tomó un tercer espectro. El primero y el último ofrecían el espectro normal de la Luna, es decir, sin ningún rasgo lunar propio; simplemente el espectro solar superpuesto a las características de absorción de la atmósfera terrestre (puesto que se trata de luz solar reflejada por la Luna y que atraviesa la atmósfera de la Tierra). Sin embargo, el segundo espectro mostraba una amplia característica espectral confinada a la zona del pico central de Alphonsus que no aparecía en los otros dos. Kozyrev la identificó como producida por la molécula de C_2. Esta identificación ha resistido la prueba del tiempo y muchos análisis críticos de la observación.

≪ El C_2 no es una molécula que se encuentre corrientemente en la Tierra, porque es muy reactiva y se combina, con el oxígeno, por ejemplo, para formar CO_2. Sin embargo, el C_2 es un constituyente de las colas de los cometas, en las que parece ser el producto de la disociación de una molécula orgánica más compleja. De modo análogo, la presencia de C_2 en la Luna se tiene que atribuir a alguna otra molécula más grande que tenga dos átomos de carbono. La más simple de éstas es el acetileno, C_2H_2 aunque también hay otras más complicadas.

La reconstrucción aceptada hoy de los acontecimientos, es que emanó acetileno u otra sustancia de molecularidad más compleja del interior de la Luna, que salió por las proximidades del pico central Alphonsus. Las moléculas fueron entonces bombardeadas por radiación solar que las descompuso en fragmentos más simples y, entre éstos, el C_2. Las moléculas de C_2 fueron a continuación excitadas por la luz solar, siendo la absorción y la emisión de luz del C_2 la razón del espectro de Kozyrev.

≪ Aunque Kozyrev, lo mismo que Herschel, atribuyó lo que vio a vulcanismo lunar, hay pocas pruebas de vulcanismo activo del tipo terrestre en la Luna. Pero como demostraron las observaciones de Kozyrev, puede que la emanación de gases sea un proceso contemporáneo de la Luna. Además, en el cráter Alphonsus hay otros cráteres que están rodeados de un halo oscuro. Se puede apreciar una decoloración general en la región del cráter grande en la parte baja central de la figura 21-4, en la base de Alphonsus. Se ha postulado que esos cráteres de halo oscuro son también el resultado de emanaciones gaseosas procedentes de sustancias del interior de la Luna, entre las cuales una podría ser el acetileno. Las observaciones de Kozyrev, los halos y los informes más recientes de resplandores y de nubes de gas, sugieren efectivamente la presencia de materia orgánica debajo de la superficie lunar que la atraviesa y se escapa.

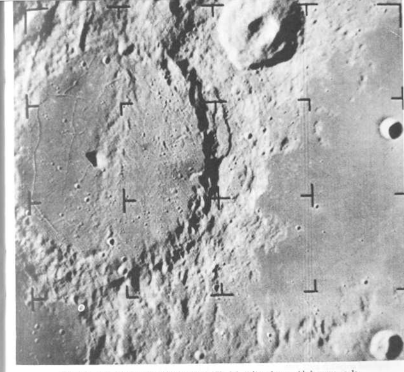


Figura 21-9. Fotografía del Ranger IX del cráter lunar Alphonsus, a la izquierda. El pico en el centro de este cráter es la fuente aparente de la emisión de gas vista por Kozyrev y otros. No se observa en él abertura central. (Cortesía de la NASA.)

22

Mercurio y Venus: medio ambiente y biología

. . . Me he preguntado muchas veces cuando he observado a Venus . . . que siempre me parece todo él igualmente brillante y no puedo decir que haya visto en él ni una mancha . . . ¿No será toda esa luz que vemos la reflejada por una atmósfera que rodea a Venus?

Christiaan Huygens, *Nuevas conjeturas respecto a los mundos planetarios, sus habitantes y producciones* (1670)

I. Mercurio

≪ Hasta hace poco, al planeta Mercurio se le describía tanto como el lugar más caliente como el más frío del sistema solar. Por ser el planeta que está más cerca del Sol y porque absorbe casi toda la luz solar que le llega, su hemisferio iluminado tiene que estar muy caliente. Pero, puesto que se creía que su rotación coincidía con su traslación presentando siempre la misma cara hacia el Sol, parecía que el lado opuesto no tendría más calor que el que saliera de su interior y el que le diera la luz de las estrellas - fuentes de energía tan débiles que las temperaturas se estimaban en su hemisferio del orden de 20 a 30 grados absolutos (−253 a −243° C).

≪ Las mediciones en el infrarrojo y de radioondas del lado brillante confirmaron las altas temperaturas supuestas por teoría; se obtuvieron valores próximos a 350° C. Recientemente, el astrónomo americano Kenneth Kellerman, con el radiotelescopio de Parkes, cerca de Sidney, Australia, ha efectuado las primeras mediciones exactas de la temperatura en el lado oscuro de Mercurio y encontrado que son próximas a los 0° C, temperatura normal de fusión del hielo. Así pues, como el lado brillante de Venus está más caliente y las nubes de los planetas joviales más frías, resulta que Mercurio no es ni el lugar más caliente ni el más frío del sistema solar.

≪ ¿Cómo se mantiene la temperatura en el lado sin sol? Una posibilidad es que su rotación no sea sincrónica. Las observaciones de Schiaparelli, Antoniadi y Dollfus que condujeron a las deducciones de la rotación sincrónica, son muy difíciles de realizar. La figura 22-1 muestra tres dibujos hechos por Dollfus en el Observatorio Pic du Midi, en los Pirineos franceses, que es uno de los mejores lugares de observación de la superficie de Mercurio. Cada dibujo corresponde a las observaciones hechas en noche diferente. Excepto por el balanceo de la posición del eje de rotación de Mercurio - fenómeno conocido como libración - muestran aproximadamente las mismas regiones. Si bien la configuración general de los detalles es muy parecida en los tres dibujos, las diferencias entre ellos ilustran las dificultades para observar un objeto tan pequeño y tan cercano al Sol como es Mercurio. La característica sobresaliente de los mapas de todos los observadores de Mercurio es que todos muestran el mismo hemisferio, mientras que si la rotación del planeta no fuera sincrónica se podrían ver, en distintas épocas, aspectos de ambos.

≪ Para observar la rotación de Mercurio se han empleado los métodos más recientes con radar. El sistema para determinar la velocidad de rotación

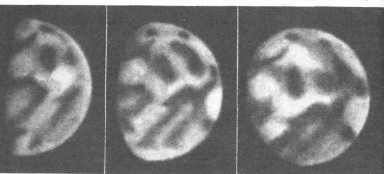


Figura 22-1. Tres dibujos del hemisferio iluminado del planeta Mercurio, hechos por el Dr. Audouin Dollfus en octubre de 1950. Cada una representa el cotejo de varias observaciones. Evidentemente, Mercurio presenta fases como la Luna. (Cortesía del Dr. Audouin Dollfus.)

es exactamente análogo al método del efecto Doppler que se citó en el capítulo 13 para averiguar las velocidades de rotación de las estrellas. Cuando en una superficie planetaria se refleja un pulso de radar, el borde que se acerca a la Tierra cambia la frecuencia del pulso de radar reflejado a menores longitudes de onda, mientras que el que se aleja lo desplaza a longitudes de onda más largas por efecto Doppler. Un pulso de radar que tenga una banda de frecuencia muy pequeña, tendrá, por efecto de la rotación planetaria, un margen mucho más amplio cuando se reciba reflejado. Con el radiotelescopio más grande del mundo, que tiene un paraboloide de 1000 pies de diámetro (305 metros), y que está instalado en Arecibo, Puerto Rico, los radioastrónomos americanos Gordon H. Pettengill y Rolf Dyce, de la Universidad de Cornell, han demostrado que Mercurio no gira, al parecer, de modo sincrónico; en vez de hacerlo cada ochenta y ocho días - que sería un período de rotación igual al de describir su órbita - los resultados del radar sugieren que Mercurio efectúa una revolución sobre sí mismo cada cincuenta y seis días. Si así es el caso, queda resuelto el problema de la conservación de temperaturas relativamente altas en su hemisferio oculto. Hasta el lugar más frío de Mercurio recibiría unas semanas de luz solar y no tendría tiempo suficiente para enfriarse a temperaturas inferiores a las observadas. Sin embargo, el conflicto entre las observaciones visuales y las de radar, que ambas son difíciles de realizar, sigue en pie y en el momento actual no podemos afirmar que esté resuelto el problema.

≼ Las observaciones polarimétricas de Audouin en Francia y las espectroscópicas de V. I. Moroz en la Unión Soviética, han indicado las dos que Mercurio tiene, aunque muy tenue, una atmósfera definida. El hemisferio iluminado de Mercurio presenta rasgos permanentes, que son los dibujados en la figura 22-1. Antoniadi en la década de 1920 informó de haber visto "velos" atmosféricos que oscurecían temporalmente los rasgos oscuros, de modo análogo a lo que sucede en Marte. También los velos sugieren la existencia de cierta atmósfera.

≼ El que Mercurio tenga aunque sea un poco de atmósfera es extraordinario, pues por su proximidad al Sol la temperatura en su exosfera tiene que ser muy elevada, lo cual, unido al débil campo gravitatorio del planeta supone que excepto las moléculas más pesadas se habrían escapado ya en la historia del sistema solar. El gas que identificó Moroz es dióxido de carbono, que aunque realmente es un gas bastante pesado, se habría escapado ya en lo que tiene de vida Mercurio. La existencia de atmósfera en Mercurio se debe probablemente a un equilibrio entre emanación de gas y escape del mismo. Del interior de Mercurio sale CO_2 y otros gases, pasan un tiempo breve en la atmósfera y se escapan de la exosfera. El gas que observamos a veces tiene que ser el que está en tránsito entre el interior de Mercurio y el espacio interplanetario.

≼ Si Mercurio estuviera en rotación síncrona, su hemisferio oscuro podría calentarse por los gases calientes que circulan del hemisferio iluminado al oculto llevando consigo su calor. Para ello se requieren velocidades enormes de los vientos, de cientos de kilómetros por hora. Si nos imaginamos situados en Mercurio cerca del crepúsculo veremos el Sol dos veces y media mayor que contemplado desde la Tierra y a poca altura en un cielo oscuro. El paisaje ante nosotros sería aún más asolador, deslucido y marchito que en nuestra Luna sin aire. Notaríamos un viento poco denso pero violento que soplaría hacia nosotros. Las temperaturas en el lado brillante de Mercurio son más elevadas que las más altas de un horno normal y nos es difícil imaginar cualquier vida que pudiera prosperar bajo un cielo tan cruel y abrasador.

≼ Tras nosotros está el lado oscuro; creemos que las temperaturas en él son uniformes, pero no sabemos nada más al respecto. Probablemente carece de una atmósfera extensa porque recircularía al lado brillante y se evaporaría al espacio interplanetario. Es probable que de forma temporal haya agua líquida en el lado oscuro y, por tanto, podemos empezar a pensar sobre la posibilidad de vida en dicho lado de Mercurio. Sin la luz del Sol no podemos esperar la fotosíntesis de las plantas. Hay otras fuentes de energía, pero por la escasez de conocimientos, no merece la pena especular sobre ellas. Y con todo, en una lista de planetas interesantes biológicamente, habría que incluir a Mercurio. La NASA ha expresado sus esperanzas de que pronto pueda empezarse la exploración de la superficie de Mercurio por naves no tripuladas.

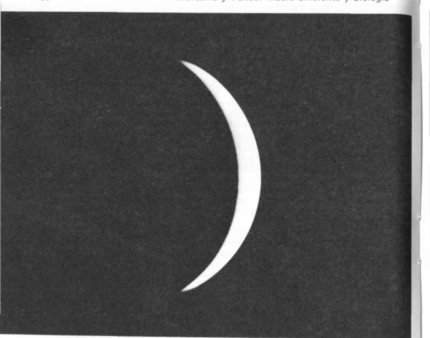


Figura 22-2. Venus, fotografiado con luz azul, en fase creciente. A todas las frecuencias visibles, las fotografías de Venus como ésta no muestran accidentes distinguibles en el disco. (Cortesía de los Observatorios de Monte Wilson y Monte Palomar.)

II. Venus

≪ Visto a través de un gran telescopio, contemplar a Venus es aún más decepcionante que a Marte. Cuando el planeta está lleno, vemos un disco carente por completo de accidentes. En el transcurso de los meses Venus presenta fases como la Luna, ya que lo mismo que ésta, pasa entre el Sol y nosotros y lo más corriente es que lo veamos mostrando cierta posición del terminador, es decir, viendo sólo una parte del hemisferio iluminado. El

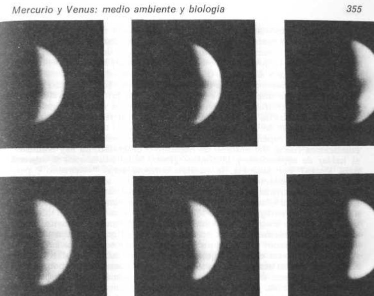


Figura 22-3. Seis fotografías de Venus tomadas con luz ultravioleta. A estas frecuencias, a veces se pueden distinguir accidentes, especialmente cerca del terminador- la línea que separa el hemisferio brillante del oscuro. Los rasgos con ultravioleta varían de día a día, quizá de hora a hora, como se ve en estas fotografías. Con luz ultravioleta, lo mismo que con la visible, lo que observamos es la capa de nubes de Venus y las variaciones con la ultravioleta, lo que indican, como máximo, son movimientos violentos de las nubes. (Cortesía de los Observatorios de Monte Wilson y Monte Palomar.)

hemisferio oscuro se hace invisible en la negrura del espacio más allá y lo único que vemos es la fase del hemisferio iluminado (figura 22-2). Cuando se fotografía el planeta con luz ultravioleta, se pueden apreciar unos débiles y desvanecientes rasgos (figura 22-3), Venus está rodeado por una nube grande y continua que lo cubre y cuya composición se desconocía hasta hace poco. Lo mismo en la visible que en la ultravioleta, lo único que vemos son las nubes de Venus.

≪ Antes de proseguir con el tema de Venus, hay un problema semántico que tenemos que resolver primero. Excepto para la Tierra, los nombres de

los planetas se derivan de los dioses de la mitología romana. A cada uno de esos dioses le corresponde cierto carácter, cualidad personal o término geológico que se conmemora en forma adjetival: Mercurio, mercurial; Marte, marcial; Júpiter (o jove), jovial; Saturno, saturniano; Neptuno, neptuniano y Plutón, plutónico. En el caso de Venus, el adjetivo correspondiente es "venéreo". Mucho tiempo después de que estas palabras fueran de uso común, los astrónomos se dieron cuenta de la necesidad de formas adjetivales planetarias que no se confundieran con adjetivos semejantes y distinto significado. Para algunos planetas no hubo problema. Así, de Mercurio, mercuriano; de Marte, marciano; de Júpiter, es jovial; de Saturno, saturnal y de Urano, uraniano. Como apenas se han realizado estudios astronómicos sobre las condiciones físicas del entorno de Neptuno y de Plutón, no hay confusión al hablar de neptuniano y plutónico. ¿Pero, cómo bautizamos al adjetivo para Venus? Por analogía, la palabra correcta sería "venereano", pero muchos astrónomos consideran que se parece mucho a su otro adjetivo de uso en otras actividades del género humano. El astrónomo italo-americano Luigi Jacchia del Observatorio Astrofísico Smithsoniano, ha propuesto que a pesar de todo se diga "venereano" y *Hom soit qui mal y pense* (1). No obstante no ha sido acogida en las obras científicas. A veces se encuentra, como alternativa, "venusiano" que es un barbarismo igual que si se dijera "martesiano", "jupiteriano" o "geosiano". La diosa griega equivalente a Venus es Afrodita y, en este caso, el adjetivo apropiado es "afrodisiano" o "afrodisial", que también tienen otros parecidos y, algunos astrónomos, por claridad y decoro prefieren no emplearlos. La solución que más parece aceptarse es "citéreo", de la isla jónica Citera, donde se dice que apareció la diosa surgiendo de las aguas. En el cuadro alegórico mitológico *El nacimiento de Venus*, de Botticelli, aparece pintada al fondo a la derecha.

≪ Tras esta disgresión gramatical con la cual no todo el mundo estará de acuerdo, prosigamos con el entorno citéreo. Como Venus está oculto por las nubes que lo envuelven, el examen telescópico directo de su superficie era superior a las posibilidades de los primeros observadores planetarios. A falta de observaciones directas aducían diversidad de ambientes diferentes sin relación alguna. Como las únicas nubes que se conocían eran las de agua, el espesor aparente de la capa de nubes citéreas les hacía presumir una gran abundancia de agua y, de eso, sólo había un paso a la afirmación de Svante Arrhenius publicada en 1918 de que

> todo en Venus está rezumando humedad . . . no hay duda que gran parte de la superficie de Venus esta cubierta de pantanos . . . Las condiciones climáticas uniformemente constantes que allí existen en cualquier lugar dan por resultado la total falta de adaptación a las condiciones variables exteriores. Sólo pues están representadas las formas de vida sencillas, sin duda, pertenecientes al reino vegetal la mayoría. Y los organismos son casi de la misma clase por todo el planeta.

1.- N. del T. Expresión francesa: Mal haya el que mal piense.

Como se recordará, Arrhenius había criticado a Lowell por sacar demasiadas consecuencias sobre Marte a partir de muy pocos datos.

≪ Podría pensarse que las observaciones espectroscópicas de un mundo tan húmedo como ése, demostrarían fácilmente la presencia de vapor de agua en la atmósfera. Y así, fue con sorpresa que los observadores de la década de los 1920 vieron que no podían, en absoluto, hallar vapor de agua en las nubes de Venus. Fue entonces que se abandonó la idea de marisma del carbonífero y se sustituyó por la de un planeta árido y desierto. Las nubes no podían ser pues de agua; en su lugar, se atribuyeron a un manto permanente de polvo levantado por el viento que barría la superficie.

≪ No satisfechos con esa explicación de las nubes blancas brillantes de Venus a base de polvo, los astrónomos americanos Donald H. Menzel y Fred L. Whipple, de la Universidad de Harvard, dijeron en 1955 que la falta de vapor de agua detectable por espectroscopía no era un buen argumento en contra de las nubes de agua. El caso se podía demostrar por simple analogía con una cacerola de agua cuya temperatura podía regularse. En un momento dado, algunas de las moléculas de agua que se mueven más deprisa rompen los débiles enlaces químicos que las unen a sus vecinas y se escapan de la cacerola y, en el mismo instante, ocupan su lugar otras procedentes de la capa atmosférica que tiene encima. De igual modo que en la atmósfera de Mercurio, la cantidad de vapor de agua sobre la cacerola depende del equilibrio entre los dos procesos. Cuando reducimos la temperatura de la cacerola, hay muchas menos moléculas en ella con movimiento rápido y, por tanto, muchas menos moléculas de vapor de agua en la atmósfera que la cubre. Si la temperatura del agua es suficientemente baja - digamos muchas decenas bajo 0° C para que se haya congelado y convertido en hielo - entonces, la cantidad de vapor de agua sobre la cacerola será muy poca verdaderamente.

≪ A partir de la emisión infrarroja de Venus, se determinó que la temperatura de sus nubes es aproximadamente de —40° C. Y si están compuestas de cristales de hielo, a esa temperatura de —40° C, no se podría detectar la cantidad de vapor de agua sobre ellas sin que por ello hubiera contradicción con los resultados espectroscópicos. Menzel y Whipple prosiguieron el estudio y postularon que si en las nubes había grandes cantidades de agua, todavía mayores serían las existentes en la superficie. En las infructuosas investigaciones anteriores en búsqueda de vapor de agua, por puro accidente se encontró que en la atmósfera de Venus había grandes cantidades de dióxido de carbono y Menzel y Whipple propusieron al efecto que la superficie de Venus estaba en gran parte cubierta por océanos carbonatados - por agua carbónica.

≪ Como último ejemplo de la diversidad de descripciones de Venus que podían deducirse de los pocos datos disponibles entonces, consideremos el modelo propuesto también en 1955 por Fred Hoyle. Al principio de la histo-

ria de cualquier planeta, tiene que haber cierta cantidad de agua y de otras sustancias que emanan gasificadas del interior, como ya vimos en el capítulo 16. En la atmósfera superior del planeta el vapor de agua tiende a disociarse por la luz ultravioleta que irradia el Sol; el hidrógeno se escapa al espacio y el oxígeno se queda atrás para oxidar la atmósfera. (Véase el capítulo 16.) Si inicialmente el planeta tiene mucha más agua que hidrocarburos, todos estos acabarán oxidándose y el medio ambiente acabará siendo acuoso y oxidante como el de la Tierra. Pero si el complemento inicial de hidrocarburos excede grandemente a la cantidad de agua, toda ésta se consumirá y únicamente oxidará una parte de los hidrocarburos convirtiéndolos en CO_2 y el resultado será una atmósfera de dióxido de carbono con una superficie cargada de hidrocarburos. Aunque se cree que la atmósfera de Venus está compuesta principalmente de N_2 por el mismo argumento por defecto que encontramos para Marte (capítulo 19), la proporción de CO_2 es quizá cien veces mayor que en la atmósfera terrestre. Por ello Hoyle supuso que la superficie de Venus estaba cubierta de petróleo o de otros hidrocarburos y que la capa de nubes era niebla de contaminación, como en las ciudades industriales.

≪ El estado de conocimientos sobre Venus en 1956 queda ampliamente ilustrado por el hecho de que la marisma del carbonífero, el desierto barrido por el viento, el campo petrolífero planetario y el océano de agua carbónica, tenía cada uno sus seguidores formales. Aquellos optimistas que planeaban en 1956 enviar a Venus una nave tripulada, hubieran tenido grandes dificultades para decidir si mandaban un paleobotánico, un minerólogo, un geólogo especialista en petróleos o un buzo de las profundidades. Sabemos ahora que ninguna de esas descripciones es correcta y que la verdadera tiene detalles de varios de los primeros modelos de Venus.

≪ En 1956, un grupo de radioastrónomos americanos del Laboratorio de Investigación de la Armada de los Estados Unidos, dirigido por Cornell H. Mayer, enfocaron por primera vez un gran radiotelescopio hacia Venus. Las observaciones se hicieron próximas a la conjunción inferior, momento en que Venus se encuentra más cerca de la Tierra y en el que, además, observamos casi exclusivamente el hemisferio oscuro del planeta. Mayer y su equipo se quedaron atónitos al hallar que Venus radiaba como si fuera un objeto caliente, a una temperatura del orden de 300° C. Estas observaciones han sido confirmadas por otras a distintas longitudes de onda y demostrado que la temperatura deducida de Venus aumenta al apartarse de la conjunción inferior - es decir, a medida que vamos viendo mayor parte del hemisferio iluminado. La explicación más lógica de estas observaciones es que la superficie de Venus está caliente - bastante más que lo que nadie había imaginado. Venus está a unas 0,7 U.A. del Sol. Por la ley de la inversa del cuadrado debería recibir $1/0{,}7^2$ ó como dos veces más energía solar que la Tierra. Por otra parte, sus nubes son sumamente reflectantes. Cuando se tienen en cuenta ambos efectos, se comprende que a pesar de su menor distancia al Sol, Venus absorbe mucha menos luz de éste que la Tierra. De ordinario, no tiene que estar ni siquiera tan caliente como la Tierra y, sin embargo, estaba a 300° C.

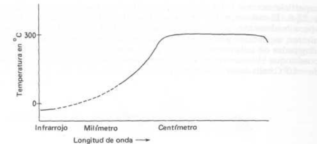


Figura 22-4. Representación esquemática del espectro de longitud de onda larga de Venus. La temperatura observada asciende desde unos −40° C y las longitudes de onda del infrarrojo, a más de 300° C, a longitudes de onda del centímetro. Cualquier modelo del entorno de Venus puede explicar este espectro.

≪ Algunas de las primeras dificultades para explicar detalladamente las altas temperaturas superficiales llevaron a otra explicación de la intensa radiación radio de Venus. Douglas E. Jones, físico americano del laboratorio de propulsión a reacción de la NASA, postuló que las altas temperaturas no corresponden a la superficie de Venus, sino a una capa densa ionizada o ionosfera elevada en la atmósfera citérea. La diferencia entre los modelos de

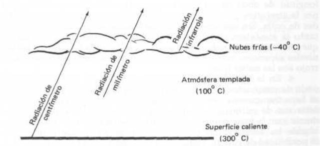


Figura 22-5. Representación esquemática del modelo de Venus de superficie caliente.

superficie caliente y los de ionosfera caliente se puede ver en las figuras 22-5 y 22-6. El radioespectro de Venus cuando está en conjunción inferior es, aproximadamente, como el de la figura 22-4. A longitud de onda de centímetros, se deduce para todas ellas la misma temperatura de 300°C, pero a longitudes de milímetros hay un rápido descenso, tal como era de suponer, puesto que el espectro tiene que unirse con ligera pendiente a la temperatura de —40°C hallada en el infrarrojo.

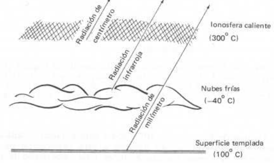


Figura 22-6. Representación esquemática del modelo de Venus de densa ionosfera caliente.

⩽ En la hipótesis de superficie caliente (figura 22-5) la radiación a longitud de onda de centímetros se emite desde la superficie y transmite por la atmósfera y las nubes, que tienen que ser transparentes a esas longitudes de onda. Sin embargo, cuando las longitudes de onda son de milímetros, tanto la atmósfera como las nubes tienen que absorber la radiación por lo que, en realidad, la radiación a longitudes de onda más cortas parten de los niveles superiores más fríos de la atmósfera. Lo que observamos en el infrarrojo son las nubes frías.

⩽ En la hipótesis de la ionosfera caliente, en cambio, a longitudes de onda de centímetros lo que observamos es la emisión de la ionosfera, la cual se hace transparente cuando las longitudes de onda son más cortas y cuando éstas son de milímetros, lo que observamos es la radiación emitida directamente por la superficie (figura 22-6). Obsérvese que el modelo ionosférico impide las temperaturas relativamente bajas en la superficie y, por tanto, la posibilidad de vida en Venus. Esta es su gran consecuencia.

⩽ Se puede ver la diferencia entre los modelos de ionosfera caliente y superficie caliente si imaginamos un radiotelescopio explorando el disco de

Venus sintonizado a longitud de onda de un centímetro. En el modelo de superficie caliente, las nubes y la atmósfera absorben ligeramente esa longitud de onda de 1 cm, por lo que cuando el radiotelescopio apunta hacia el borde del disco hay más materia absorbente en la trayectoria de la luz que cuando se apunta al centro del disco (figura 22-7). Así pues, en el modelo de superficie caliente, tendrá que haber menos radiación procedente de los bordes o limbos de Venus, que del centro, circunstancia que se conoce como oscurecimiento del limbo.

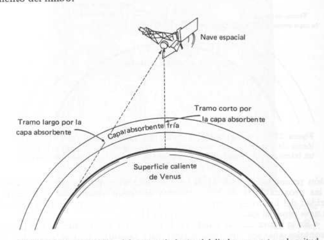


Figura 22-7. Ilustración del oscurecimiento del limbo supuesto a longitud de onda de un centímetro si Venus tiene una superficie caliente y una capa absorvente fría. Cuando la nave espacial mira hacia el limbo del planeta, lo hace a través de una cantidad mayor de materia absorbente y, por tanto, ve una temperatura efectiva menor.

⩽ Por contraste, consideremos el modelo de ionosfera caliente (figura 22-8). En este caso, es la ionosfera semitransparente la fuente principal de emisión a longitud de onda de 1 cm. El radiotelescopio ve en el centro del disco un espesor menor de ionosfera emisora que en los bordes y allá donde haya más material emisor, mayor será la emisión. Así, el modelo de ionosfera caliente predice el brillo del limbo. Por desgracia, los radiotelescopios de que disponemos son incapaces de resolver o de explorar distintos lugares de Venus. A longitud de onda de 1 cm lo único que pueden determinar es la

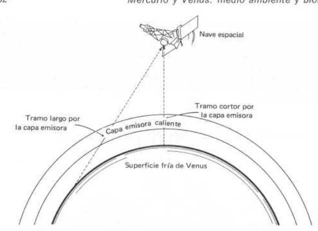


Figura 22-8. Representación del brillo del limbo supuesto con el modelo iónico de Venus. En este caso, cuando la nave espacial mira hacia el limbo ve un tramo mayor de material emisor y, por tanto, ve una emisión enriquecida.

emisión promedio de todo el disco. Un radiotelescopio pequeño que volara por las proximidades de Venus podría distinguir entre brillo del limbo y oscuridad del limbo explorando el disco citéreo, lo cual fue misión primaria de la nave espacial estadounidense Mariner II.

⩽ En la figura 22-9 se puede ver la fotografía del Mariner II. Los paneles horizontales abiertos son pilas solares para convertir en electricidad la luz del Sol. Abajo del todo hay una antena direccional para transmitir por radio a la Tierra los resultados científicos. El radiotelescopio empleado para explorar el disco de Venus es el pequeño plato que se encuentra justo encima del alojamiento electrónico hexagonal principal.

⩽ El 14 de diciembre de 1967, el Mariner II pasó a 35000 - 40000 km de Venus y exploró su disco a dos longitudes de onda próximas al centímetro. No pudo hallar el brillo del limbo, pero sí perfectamente el oscurecimiento del mismo. Esos resultados contradicen la hipótesis de la ionosfera caliente y, en cambio, apoyan el modelo de superficie caliente.

⩽ Este experimento del Mariner II fue un ejemplo excelente de la función de los vehículos espaciales en la investigación de los entornos planetarios. Se había propuesto un modelo concreto de Venus que estaba de acuerdo con la mayoría de las observaciones que entonces se habían hecho. De él se deducían consecuencias que eran diferentes a las correspondientes

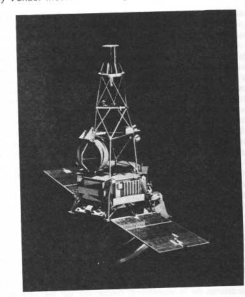


Figura 22-9. Fotografía del vehículo del espacio Mariner II tal como se hubiera visto cuando volaba hacia Venus el 14 de diciembre de 1962. Los radiómetros de microondas e infrarrojos están montados en el disco que hay en la superestructura metálica, justo encima de la sección central de la nave. (Cortesía de la NASA.)

de otros modelos, pero que no podían comprobarse desde las proximidades de la Tierra; hacía falta una nave especial. Se proyectó ésta y el radiotelescopio y se construyeron a la vez. A pesar de la circunstancia de que no se cumplieron algunos de los resultados que se esperaban, tanto la nave como el radiotelescopio exploraron lo suficiente para dar pruebas críticas del modelo teórico.

⩽ Invalidado el modelo ionosférico . . . ¿qué es lo que hace que Venus esté caliente? A partir de múltiples observaciones en el visible, en el infrarrojo y a frecuencias de radio, se ha llegado recientemente a la conclusión de que las nubes de Venus están formadas efectivamente por agua: cristales de hielo en las capas frías superiores de las nubes, que son las que se ven en las foto-

23

El sistema solar más allá de Marte: entornos y biología

Los habitantes de Júpiter tienen que ser . . . a lo que parece, cartilaginosos y de masas viscosas. Si allí hay vida, no parece de ningún modo que las cosas vivientes sean nada más en la escala de los organismos, que esas criaturas sin hueso, serosas y carnosas . . .

William Whewell, 1854

I. Júpiter

≪ Viajando hacia fuera del Sol, vislumbramos nuestra conocida Tierra y al rojizo Marte del cual ya hemos hablado. Si pasamos esas montañas de ruinas y pedruscos que se mueven erráticamente, los asteroides, llegamos al poderoso Júpiter, once veces mayor que la Tierra, trescientas veces más masivo, en el que el día tiene diez horas nuestras y el año doce años nuestros. El más próximo y más conocido de los planetas joviales es todavía mucho menos conocido que Venus o Marte.

≪ Cuando observamos a Júpiter, vemos una masa turbulenta de nubes y gases que gira en torbellino. La atmósfera de Júpiter está compuesta principalmente de hidrógeno y helio, con menores contenidos de amoníaco, metano y, probablemente, agua. Se cree que sus nubes (figura 23-1) están compuestas de cristales de amoníaco congelado, aunque esto no es cierto. La temperatura en las nubes es del orden de los −100° C. En este ambiente de sustancias desconocidas y bajas temperaturas, se observa como aparecen repentinamente manchas en las nubes joviales. Debido a la rotación diferencial de Júpiter (gira más deprisa en el ecuador que hacia los polos), las manchas se alargan y forman las conspicuas y brillantemente coloreadas bandas que son una marca de contraste de los planetas joviales. La gran mancha roja de Júpiter, que se ve en la parte superior izquierda de la porción central de la figura 23-1, es un rasgo generalmente de color rojo ladrillo observado probablemente durante los tres últimos siglos. Se desconoce su composición y su origen. Júpiter es una fuente poderosa de emisión de radioondas, pero a diferencia de Venus, la emisión no procede de ninguna capa subyacente; probablemente es radiación sincrotrón como la que caracteriza a los restos de supernovas. (Véase el capítulo 7.) Se cree que Júpiter tiene un intenso campo magnético que atrapa las partículas cargadas del viento solar y que produce el análogo a las zonas de radiación de Van Allen. Esas partículas cargadas se aceleran por el campo magnético de Júpiter y son inducidas por el mismo a emitir radiación sincrotrón.

≪ Nadie sabe qué hay bajo las nubes de Júpiter. Como en todas las atmósferas planetarias, tiene que aumentar la densidad del aire a medida que se consideran puntos más bajos de las nubes. Por los movimientos de los satélites de Júpiter, se ha llegado a la conclusión de que no hay una superficie sólida a poca distancia por debajo de las nubes. La atmósfera es extensa y sólo se alcanzarán grandes densidades (gaseosas) a pocos kilómetros por debajo de las nubes. La atmósfera de Júpiter ha de tener densidades que se aproximen a las de los sólidos ordinarios. Bajo esas enormes presiones,



Figura 23-1. Júpiter con luz azul mostrando bandas y anillos paralelos al ecuador y arriba, a la izquierda, la Gran Mancha Roja. (Cortesía de los Observatorios de Monte Wilson y Monte Palomar.)

los materiales adquieren propiedades poco comunes; el caminar por los límites inferiores de la atmósfera jovial tiene que ser algo parecido a nadar. En cierto sentido, Júpiter es un vasto océano planetario, no de agua, sino de hidrógeno y helio, con menores cantidades de metano, amoníaco y agua. Bastante más abajo, en lo más recóndito de las entrañas joviales, según el astrónomo germano-americano Rupert Wildt, de la Universidad de Yale, abunda el hidrógeno metálico, que es una forma anormal del mismo que sólo se obtiene a enormes presiones.

⋞ Ha sido costumbre negar inmediatamente la posibilidad de vida en Júpiter alegando los gases venenosos y las temperaturas congelantes. Pero recordemos que los gases de la atmósfera jovial están bastante lejos de ser venenos inequívocos; evidentemente, son exactamente los componentes de la atmósfera primitiva en la cual apareció la vida en la Tierra. (Capítulo 17.) Y aunque las temperaturas en la parte superior visible de las nubes sean muy bajas, es casi seguro que se han de encontrar temperaturas ambientes como las nuestras al descender unas pocas decenas de kilómetros. La luz ultravioleta proporciona energía a la atmósfera superior y las descargas de los rayos tienen que ser corrientes en las nubes. En una atmósfera de hidrógeno, metano, amoníaco y agua y abundancia de fuentes de energía y temperaturas uniformes, tenemos exactamente las condiciones usadas en los experimentos sobre el origen de la vida en la Tierra. (Véase el capítulo 17.)

Los modelos teóricos de la atmósfera jovial bajo las nubes visibles, preparados por el astrónomo francés Roger Gallet en la Oficina Nacional de Medidas de los EE. UU., predicen incluso la existencia de una espesa nube de agua líquida. Parece pues que no hay evasión para que abiológicamente se produzcan hoy grandes cantidades de moléculas orgánicas en la atmósfera de Júpiter y que tales condiciones se están manteniendo desde hace $4{,}5 \times 10^9$ años. Júpiter es en realidad un inmenso laboratorio planetario de síntesis orgánica prebiológica.

⋞ Es mucho más difícil decir algo al respecto sobre la posibilidad del origen y existencia de vida presente en Júpiter. Por ejemplo, podemos imaginar organismos en forma de sacos de gas lastrados que flotan de un nivel a otro en la atmósfera jovial y que incorporan a su cuerpo la materia orgánica preformada, de forma parecida a como las ballenas de nuestros océanos se comen el plancton. Sin embargo, estas especulaciones caracen de utilidad excepto si se consideran como estímulos para futuros estudios. Pero cuando de aquí a cien años se complete el reconocimiento detallado de nuestro sistema solar, puede muy bien resultar que las mayores sorpresas y los avances biológicos más notables concurran en la exploración de Júpiter.

II. Saturno, Urano, Neptuno y Plutón.

⋞ El resto de los planetas joviales, Saturno, Urano y Neptuno, se cree que en su composición y estructura general son semejantes a Júpiter, pero como están más lejos del Sol, las nubes que los cubren son más frías y, como están más lejos de nosotros, resultan más difíciles de estudiar. Saturno (figura 23-2) tiene manchas y bandas atmósfericas semejantes a las de Júpiter, pero además tiene una característica extraordinaria: sus anillos. Estos, en vez de ser una fina capa, como supusieron ingenuamente los primeros astró-

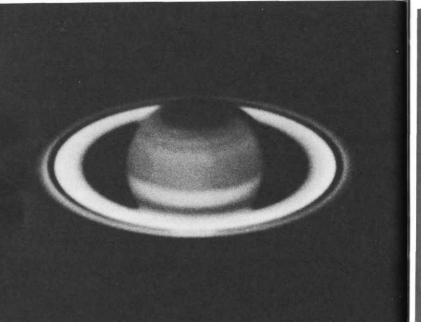


Figura 23-2. Saturno y su sistema anular. Sobre el cuerpo de Saturno se puede ver un sistema de bandas y anillos, igual que las diversas divisiones del sistema anular. (Cortesía de los Observatorios de Monte Wilson y Monte Palomar.)

nomos, son un lejano enjambre de pequeñas partículas en órbita alrededor de Saturno, lo mismo que los planetas y los asteroides lo hacen alrededor del Sol. Los constituyentes de la parte más interna de los anillos giran alrededor de Saturno en un tiempo significativamente más corto que los de la parte externa. El astrónomo americano Fred Franklin del Observatorio Astrofísico Smithsoniano, ha determinado el espesor de los anillos que, como máximo, son de unos pocos centímetros. Los espectros de los anillos y otras consideraciones teóricas indican que pueden estar compuestos de hielo de agua



Figura 23-3. Comparación de fotografías típicas de Marte, Júpiter, Saturno y Plutón. (Cortesía de los Observatorios de Monte Wilson y Monte Palomar.)

ordinaria y, si no, por lo menos están cubiertos de hielo. Así pues, los anillos de Saturno están más o menos hechos de bolas de nieve.

⩽ En la figura 23-3 tenemos una fotografía del planeta más remoto, de Plutón, comparada con las fotografías normales de Marte, Júpiter y Saturno. Plutón está a 40 unidades astronómicas del Sol e incluso en esta fotografía que está tomada con el mayor telescopio óptico del mundo no se puede distinguir de las estrellas del fondo.

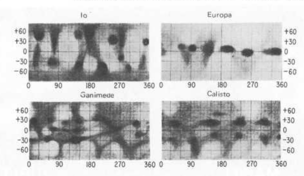


Figura 23-4. Mapas en proyección mercator de los cuatro satélites galileanos de Júpiter, Io, Europa, Ganimede y Calisto. Están basados en observaciones visuales, aunque muy recientemente se han obtenido fotografías de los mismos, con detalles de la superficie. (Cortesía del Dr. Audouin Dollfus, del Observatorio de Meudon, de París.)

III. Satélites de los planetas joviales.

≮ Los treinta y un satélites naturales de los planetas del sistema solar, varían grandemente en tamaño, aspecto y densidad general. Lo que si tienen en común es nuestra ignorancia sobre ellos. La distribución de los satélites en el sistema solar es como sigue: la Tierra, evidentemente, tiene uno; Marte, dos; Júpiter, 12; Saturno, 9; Urano, 5 y Neptuno 2. Hasta que las naves espaciales no empiecen a transmitirnos más información, nos hemos de contentar con nuestros escasos conocimientos y con los nombres que dieron los astrónomos a los satélites. Los más exóticos son los de los satélites de Urano que, en orden a su distancia del planeta son: Mimas, Enceladus, Tethys, Dione, Rhea, Titán, Hiperion, Japetus y Phoebe.

≮ El tamaño de los satélites varía desde los de Marte, Phobos y Deimos, que sólo son de unos kilómetros de radio, a Ganímedes, el satélite gigante de Júpiter que es una vez y media nuestra Luna. Más o menos del mismo tamaño que la Luna son los satélites Tritón de Neptuno, Titán de Saturno y los satélites Io, Europa y Calisto de Júpiter. Galileo descubrió a Io, Europa, Calisto y Ganímedes y por esa razón se denominan satélites galileanos de Júpiter. Las densidades medias de estos satélites varían desde la clásica de una roca - nuestra Luna, por ejemplo - a otras aparentemente inferiores a la del agua - como en el caso de los satélites de Saturno. Esos satélites de densidades tan bajas no pueden ser más que grandes bolas de motas heladas.

≮ Dejando aparte nuestro propio satélite, de los que más sabemos es de los galileanos de Júpiter Io, Europa y Calisto. En la figura 23-4 se presentan los mapas - imperfectos - que de ellos se han confeccionado a partir de las observaciones visuales. En razón a su tamaño y a la gran distancia a que se encuentran, son aún más difíciles de observar que Mercurio. Los cuatro, como Marte, muestran modelos irregulares de características oscuras y brillantes, con cierta concentración de las oscuras hacia el ecuador. Se desconoce por completo la naturaleza de las zonas oscuras; algunos creen que las semejantes a las de Marte deben guardar relación con alguna actividad biológica (Véase el capítulo 20.) Las temperaturas en las superficies de esos cuerpos son muy bajas, de —100° C en las zonas brillantes y algo menos frías en las oscuras. Nuestra ignorancia es total sobre los posibles procesos biológicos indígenas a tales bajas temperaturas.

≮ La figura 23-4 no da un cuadro del todo adecuado del brillo relativo de los satélites galileanos. Io es como tres veces más brillante en el visible que Calisto, por ejemplo (y Titán refleja todavía menos luz que Calisto). Los colores de Io y de Europa varían con la posición de sus superficies mucho más que, por ejemplo, los colores de los otros satélites galileanos. Tanto Io como el satélite de Saturno Titán son extremadamente rojos y reflejan mucha menos luz a longitudes de onda corta visibles que a largas. Este hecho puede estar relacionado con la presencia de atmósfera en esos dos satélites. Se sabe que Titán, basándose en observaciones espectroscópicas, tiene una atmósfera que contiene metano y hay algunas pruebas indirectas de que también hay atmósfera en Io. Es muy probable que las zonas brillantes de los satélites galileanos sea nieve, pero lo que no sabemos todavía es si esa nieve es de H_2O, NH_3 o de CH_4.

IV. Cometas.

≮ Los cometas han sido motivo de miedo, pavor y reverencia desde los comienzos de la historia. Aparecen como regueros brillantes sobre el fondo normal de las estrellas, como en la figura 23-5. Generalmente, no se puede apreciar su movimiento relativo al fondo con sólo observarlos una noche. Desde que se ven por primera vez hasta que están demasiado lejos para seguir viéndolos, lo normal es que transcurran unos meses. Cada año se descubren nuevos cometas, pero rara vez se pueden ver a simple vista, como el Arend-Roland de la figura 23-5, que lleva los nombres de los astrónomos aficionados que lo descubrieron.

≮ Cuando aparece un cometa que es visible a simple vista suele venir seguido de una reacción pública interesante. La última vez que se vió el cometa Halley, que fue en 1910, la Tierra pasó por su cola, que se sabía

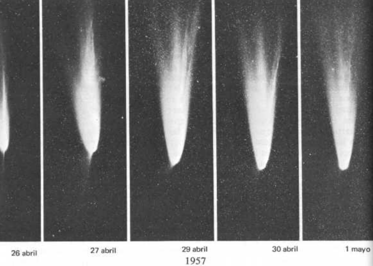


Figura 23-5. Cinco vistas del cometa Arend-Roland, tomadas todas, excepto una, en noches consecutivas. (Cortesía de los Observatorios de Monte Wilson y Monte Palomar.)

estaba compuesta de gases venenosos. Muchos esperaban ver la asfixia general en la Tierra, lo que llevó a algunos a celebrar despedidas sibaritas del mundo. Los resultados no fueron climatéricos: la densidad de la materia en la cola de los cometas es tan extraordinariamente baja que no se apreciaron consecuencias en la Tierra, excepto las de las celebraciones.

≪ El análisis espectral de la luz solar reflejada por los cometas (que no brillan con luz propia) ha indicado la presencia de moléculas de C_2, C_3, CN, CH, NH, NH_2, OH, CO, CO_2 y N_2, tanto en formas neutras como ionizadas. Muchas de estas moléculas, por ejemplo C_2 y C_3 no son corrientes dada su gran reactividad química. Existen en la cabeza y la cola de los cometas sólo porque sus densidades tienen que ser muy bajas y, en consecuencia, la probabilidad de chocar y reaccionar con otras moléculas muy escasa. La vida de las moléculas es pues lo suficientemente larga para que absorban la luz incidente del Sol y puedan detectarse por espectroscopia en observatorios situados en la Tierra. El que las colas de los cometas son muy poco densas lo comprobamos por el hecho de que a su través podemos ver las estrellas y, en algunos casos el Sol y, en otros, incluso a través de la cabeza. La única porción densa del cometa es el núcleo, que tiene unos 10 km de lado a lado; en cambio, la cola, difusa, puede llegar a ser de 10^7 a 10^8 kilómetros de larga.

≪ La teoría más aceptada sobre la naturaleza de los cometas, la del astrónomo americano Fred L. Whipple, del Observatorio Astrofísico Smithsoniano, sostiene que son conglomerados de metano, amoníaco y hielo de agua junto con mezcla de impurezas. Las órbitas de los cometas alrededor del Sol son, en general, muy excéntricas y no se pueden observar hasta que están más o menos a la distancia de Marte, lugar en el cual la intensidad de la luz solar y del viento protónico solar son suficientes para excitar las moléculas del núcleo y obligarlas hacia afuera del Sol por presión de radiación y de partículas y producen la cola visible del cometa. Las presiones de radiación involucradas son físicamente las mismas que las expuestas al hablar en el capítulo 15 de la hipótesis de la panspermia .

≪ Cuando la radiación incide en ese banco de nieve girando en órbita, las reacciones químicas entre el H_2O, el CH_4 y el NH_3 producirán moléculas orgánicas, como se ha demostrado en experimentos de laboratorio con cometas simulados. La disociación de estas moléculas orgánicas por la radiación solar lleva a fragmentos moleculares tales como el C_2 y el C_3 que son los que se observan espectroscópicamente. Las colas que así se producen, a veces, como en la figura 23-5, son múltiples mostrando gran complejidad en los detalles de su sútil estructura que puede variar de un día para otro. En su viaje de recesión del Sol, la cola precede al cometa en su trayectoria.

≪ Se cree que muchos cometas vienen de regiones que están a varios cientos de miles de unidades astronómicas del Sol; esencialmente, del espacio interestelar. El astrónomo danés Jan Ort, de la Universidad de Leiden, cree que hay una basta población de núcleos de cometas en órbita alrededor del Sol a esas enormes distancias y que en ocasiones se ven perturbados por el paso de estrellas en órbitas que penetran en el sistema solar y que detectan los astrónomos en la Tierra. Las subsiguientes perturbaciones del Sol, de Júpiter y de los otros planetas pueden llevar a los cometas a órbitas de mucho menor tamaño, de modo que sus retornos periódicos pueden ocurrir con la frecuencia necesaria para que sean observados desde la Tierra. El cometa Halley tiene un período de unos 76 años y se ha observado ya desde que se descubrió 29 veces. Su próxima aparición será en el año 1986.

≪ Si los cometas fueran residentes ordinarios del espacio interestelar (aunque en órbita alrededor del Sol), su examen minucioso daría claves importantes sobre las regiones todavía no exploradas entre las estrellas. Además, muchas teorías del origen del sistema solar mantienen que los cometas son de materia original semejante a la cual se formó el sistema solar. El análisis detallado de los núcleos cometarios podría ser de utilidad en el estudio de los principios del sistema solar, incluyendo la química orgánica primitiva. Hay cometas que se acercan tanto a la Tierra, que sería posible hoy su encuentro con una nave espacial. A este respecto ha expre-

sado su interés la organización Europea para la Investigación del Espacio, formada por varios países del oeste de Europa, para la exploración científica del espacio.

V. Los asteroides.

≪ Entre Marte y Júpiter existe una vasta comunidad de partículas cuyos tamaños van desde los 350 km del radio de Ceres hasta el tamaño de guisantes y menores, que están en órbita alrededor del Sol y constituyen el anillo de asteroides. Las repetidas colisiones entre éstos en el transcurso de la historia han producido gran número de partículas pequeñas. Al anillo de asteroides se le ha llamado "molino harinero cósmico". Las colisiones inyectan frecuentemente material en órbitas muy excéntricas; algunas cortan la de la Tierra y, por simple accidente, colisionan con nosotros en sus trayectorias alrededor del Sol. A estos fragmentos asteroidales los llamamos meteoritos. Se dividen en dos variedades generales: los metálicos y los pétreos (1), cuyas composiciones son aproximadamente idénticas a sus nombres.

≪ La Tierra se puede considerar dividida en dos regiones: el núcleo, que está compuesto - así lo creemos - principalmente por hierro, y el manto y la corteza, compuestos principalmente por silicatos. Si la Tierra fuera destrozada por la explosión de una hipotética fuerza, podríamos imaginar el espacio interplanetario sembrado de restos parecidos a los metales y piedras meteóricos. Evidentemente hay científicos de prestigio que sostienen que los asteroides son los fragmentos de un planeta destruido (2). La masa

1.— N. del T. Una clasificación más detallada de los meteoritos es la siguiente: *Holosideritos*, compuestos exclusivamente de hierro; *litosideritos*, igual contenido en hierro niquelado y en silicatos; *aerolitos* o *pétreos*, muy pobres en hierro niquelado y en silicatos, y *asideritos*, sin hierro metálico.

2.— N. del T. Existe una ley, conocida como ley de Bode, que data de 1766, según la cual y sin que se sepa por qué, sumando 4 a la serie 0, 3, 6, 12, 24, 48, 96, 192 y 384, se obtienen las distancias de los planetas al Sol tomando como módulo 10 para la distancia de la Tierra.

La curiosa exactitud de esta ley puede verse a continuación:

Mercurio	0 más 4 = 4	distancia verdadera	3,9
Venus	3 " 4 = 7	" "	7,2
Tierra	6 " 4 = 10	" "	10,0
Marte	12 " 4 = 16	" "	15,2
¿ ?	24 " 4 = 28	" "	¿ ?
Júpiter	48 " 4 = 52	" "	52,0
Saturno	96 " 4 = 100	" "	95,5
Urano	192 " 4 = 196	" "	192,2
Neptuno	384 " 4 = 388	" "	301,1
Plutón	768 " 4 = 772	" "	791,1

total del anillo de asteroides actuales equivale, más o menos a una esfera de la misma densidad que la Tierra, pero con un diámetro de unos 1000 km. Esto es equivalente a la masa de un satélite jovial pequeño y no a la de un planeta. Sin embargo, y por cuanto sabemos, es posible que gran parte de la materia se hubiera escapado durante la explosión.

≪ Si los asteroides son los restos de un planeta destruido, cabe nos preguntemos si no lo hizo volar alguna civilización técnica anterior. Podemos indicar que la destrucción de un planeta por una civilización técnica requiere un estado de progreso - si es que ésta es la palabra - bastante superior a nuestras posibilidades actuales. Por ejemplo, el gran cráter de meteoro de Arizona lo produjo un fragmento de asteroide de muy poca importancia, pero la energía consumida en la excavación del cráter por impacto explosivo, es comparable a la explosión de un arma nuclear de 20 megatones, que es casi el límite tecnológico de nuestros ingenios termonucleares.

≪ La generalidad de los astrónomos que han estudiado el problema, creen que los asteroides no son el resultado de una explosión titánica, sino más bien los restos de un planeta que nunca llegó a formarse, quizá por las perturbaciones introducidas por la marea masiva de Júpiter.

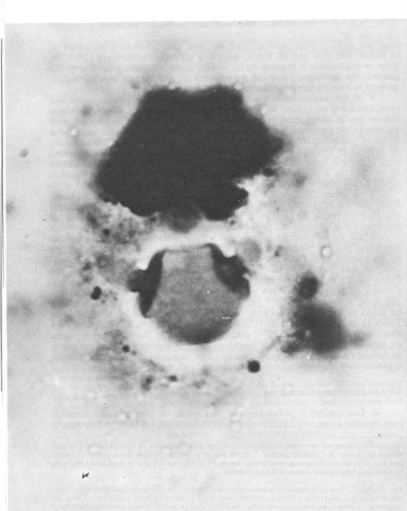
≪ La mayor fracción de los meteoritos pétreos que se conocen son condritos, por los cóndrulos, que son cuerpos globulosos vítreos incluidos en las piedras. (3). Entre los condritos, una pequeña fracción son carbonáceos, es decir, contienen cantidades significativas de esta materia orgánica. Como un 2% de los meteoritos que se conocen son condritos carbonáceos y como un 0,5% de estos, en masa, están compuestos de materia orgánica. Así pues, alrededor del 10^{-2} por ciento de toda la materia meteórica que ha caido en la Tierra es materia orgánica. Por comparación, la masa de la Tierra es de 6×10^{27} g; la de la biosfera - toda la materia orgánica viva y no viva - es unas pocas veces 10^{17} gramos. Así pues, la Tierra está compuesta de algo así como un 10^{-8} por ciento de materia orgánica y la mayor parte de ésta es de origen biológico. ¿Por qué hay un millón de veces más materia orgánica en el anillo de los asteroides que en la Tierra?

VI. Los condritos carbonáceos.

≪ Los condritos carbonáceos se han usado de tres maneras distintas para razonar sobre la presencia de vida extraterrestre. Primero, por su propia

En aquella época no se conocían Neptuno (el que más discrepa), ni Plutón, pero sí se afanaban en buscar el "planeta perdido" entre Marte y Júpiter, que se llenó posteriormente con los asteroides (distancias verdaderas entre 15 y 53), razón por la cual la creencia de que son los fragmentos de un antiguo planeta.

3.— N. del T. Los principales minerales que constituyen los cóndrulos son piroxeno, (silicatos de calcio, magnesio y hierro, constituyentes de rocas eruptivas) y olivino (silicato de magnesio y hierro, en forma de cristales, de color verde y brillo vítreo, constituyente también de rocas eruptivas).



materia orgánica. En 1864 cayó un meteorito cerca de Orgueil, en el sur de Francia, que fue analizado por el sueco Jon Jacob Berzelius y varios otros químicos famosos de aquel tiempo y quedaron asombrados ante la cantidad de materia orgánica que hallaron. La posibilidad de contaminación de la materia orgánica terrestre, por ejemplo, en el suelo donde cayó el meteorito, se comprobó que era inapreciable y la posibilidad de organismos vivos en el cuerpo parental del meteorito de Orgueil fue un tema que se trató mucho en las obras científicas.

⩽ Recientemente se sometieron el meteorito de Orgueil y otros de tipo carbonáceo a un riguroso y variado análisis químico y parece estar fuera de toda duda la existencia en ellos de parafinas de alto peso molecular, hidrocarburos aromáticos de cadenas largas como el alquitrán, ácidos grasos y porfirinas, que constituyen la parte no proteica de los pigmentos tales como la hemoglobina y la clorofila. Sabemos hoy, cosa que Berzelius ignoraba, que las moléculas orgánicas muy complejas, se pueden obtener en ausencia de vida, en condiciones reductoras. (Véase el capítulo 17.) Así pues, por si sola, la comprobación de la existencia de materia orgánica en los meteoritos, no demuestra que haya vida en el cuerpo parental de que procedan. Se ha argüido que la abundancia relativa de moléculas orgánicas en los condritos carbonáceos es semejante a la de muestras de origen biológico indiscutible, por ejemplo, sedimentos recientes incluso la mantequilla. Pero no se sabe lo suficiente respecto a la distribución relativa de las moléculas orgánicas en las reacciones sintéticas prebiológicas para corroborar esta hipótesis.

⩽ El geoquímico húngaro-americano Bartholomew Nagy y su equipo de la Universidad de California han hecho un descubrimiento todavía más intrigante. Se recordará del capítulo 14 que la actividad óptica de las moléculas orgánicas es uno de los marchamos de su origen biológico. Con pocas excepciones insignificantes (insignificantes porque las condiciones empleadas no es probable que se den en la naturaleza), todas las moléculas orgánicas obtenidas en condiciones prebiológicas simuladas, son mezclas racémicas de aproximadamente números iguales de estereoisómeros dextrógiros y levógiros. (Véase el capítulo 14.) Nagy y su equipo extrajeron cierta fracción de la materia orgánica del meteorito de Orgueil y ensayaron su rotación óptica, comprobando que era levógira. Como indicadores de las posibles fuentes de contaminación, utilizaron muestras de polvo y cera de los museos en que se había guardado el meteorito y polen, muestras de suelo y otras materias

Figura 23-6. El objeto estructurado debajo de la mancha negra es un elemento organizado de tipo 5 en la designación de Claus y Nagy, con tintura Gridley. (Cortesía del Profesor Edward Anders y del Profesor Frank Fitch, de la Universidad de Chicago y del Profesor Bartholomew Nagy, de la Universidad de California.)

orgánicas. Todas las de origen terrestre preparadas de modo semejante mostraron actividad óptica dextrógira.

⩽ Consideremos la importancia de estos resultados. El meteorito de Orgueil, como todos los condritos, es poroso. Llevaba un siglo en un museo francés, con amplias oportunidades para la contaminación y, sin embargo, aparece que todos los posibles contaminantes son dextrógiros, al revés que el meteorito, que es levógiro ¿Hemos de concluir que la materia orgánica del meteorito era levógira en un principio y que por tanto había actividad biológica en el cuerpo parental del que procedía? No necesariamente, pues podemos imaginar como se produjo la actividad incluso después de la llegada del meteorito a la Tierra.

⩽ Supongamos que originalmente tuviera únicamente una mezcla racémica de moléculas orgánicas, pero que fueran apetecibles a los microorganismos terrestres, que metabolizan con preferencia uno de los dos estereoisómeros. Como la mayor parte de la materia orgánica terrestre del tipo extraido por Nagy y su equipo era dextrógira, la materia orgánica dextrógira del meteorito podía haber sido digerida y metabolizada por microorganismos terrestres y haber quedado intacta la fracción levógira. *Con* el tiempo, el meteorito, como consecuencia de la actividad biológica terrestre, podía quedar sólo con la fracción de materia orgánica levógira. Es una lástima que a causa de la posibilidad de contaminación no podamos deducir de forma inequívoca los orígenes biológicos basándonos en la actividad óptica. Lo mismo si la fracción extraída del meteorito de Orgueil fuera levógira, dextrógira o racémica, no hubiéramos podido llegar a resultados significativos respecto a sus orígenes biológicos. Si hay que utilizar la actividad óptica para detectar vida extraterrestre, es evidente que habrá que emplear severas técnicas de esterilización, pues la contaminación biológica puede echar a perder por completo la utilidad del método.

⩽ La contaminación también es un problema en el segundo argumento de los condritos carbonáceos: el descubrimiento de elementos organizados. En el curso de sus investigaciones sobre los condritos carbonáceos, Nagy y el microbiólogo húngaro-americano George Claus, de la Escuela de Medicina de la Universidad de Nueva York, descubrieron que estos meteoritos parecían estar llenos de formas muy estructuradas, como de unos 10μm que les recordaron restos evidentes de microorganismos biológicos. Algunas eran bastante amorfas; otras, esferas estrambóticas y otras, formas verdaderamente excitantes, tales como la del elemento organizado de tipo 5 que se ve en la figura 23-6. Era una estructura que, al colorearla, aparecía como sin duda fuera de origen biológico por la complejidad de su forma. Aparentemente estaba incrustado en el meteorito y no se parecía a ningun microorganismo terrestre conocido. ¿Es el elemento organizado de tipo 5 el primer ejemplo de vida extraterrestre que se ha conocido?.

⩽ Hemos dicho que los condritos carbonáceos son porosos. En el curso de la entrada de un meteorito en la atmósfera de la Tierra, "respira" y penetra en su estructura un gran volumen de aire que contiene microorganismos,

algunos de los cuales pueden muy bien quedar incrustados en su interior. Aunque el elemento organizado de tipo 5 no se parece a ningún microorganismo terrestre, el geoquímico latvio-americano Edward Anders y el patólogo americano Frank Fitch, ambos de la Universidad de Chicago, hallaron que cuando se preparaba y teñía el polen de la cizaña por el mismo procedimiento empleado por Nagy y Claus, aparecía una estructura (figura 23-7), que se parecía extraordinariamente a la del elemento organizado de tipo 5. Quedan dos alternativas: Podemos suponer que la cizaña se da en el anillo de los asteroides, como en las ilustraciones del libro de Antoine de St. Exupery

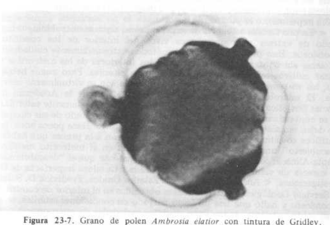


Figura 23-7. Grano de polen *Ambrosia elatior* con tintura de Gridley. (Cortesía del Prof. Edward Anders y del Prof. Frank Fitch, de la Universidad de Chicago.)

El pequeño príncipe, o que el meteorito de Orgueil estaba contaminado por el polen de la cizaña. Aunque no de buen grado, debemos inclinarnos por la segunda posibilidad.

⩽ Esto no merma la amplia variedad de otros elementos organizados identificados y denominados. Pero consideremos los problemas inherentes a su identificación. Quisiéramos estar seguros de que en el meteorito estaba ya presente el elemento organizado cuando cayó. En muchos casos esto es imposible debido a la porosidad del meteorito, como ya hemos dicho. Si el elemento organizado tiene una morfología exótica, quisiéramos estar seguros de que ningún microorganismo terrestre puede ofrecer un aspecto semejante.

Esto no siempre es fácil. Quisiéramos demostrar que los elementos organizados son en realidad, por sí mismos, compuestos de materia orgánica o una probable sustitución fósil, pero como son tan pequeños resulta difícil realizar esos análisis microquímicos.

≪ Por último, aunque pudiera demostrarse que los elementos organizados fueran compuestos de materia orgánica, morfológicamente únicos y procedentes del meteorito, no habríamos demostrado que hubiera vida en el cuerpo parental del meteorito. Como vimos en el capítulo 17, los experimentos relativos al origen de la vida han demostrado que se pueden obtener formas muy estructuradas de materia orgánica sin necesidad de vida. Estos problemas son sumamente difíciles y, por desgracia, la conclusión simple con un sólo experimento es puramente ilusorio.

≪ En una tercera categoría de experimentos, algunos microbiólogos han tratado de extraer microorganismos vivos del interior de los condritos carbonáceos. Han procurado emplear métodos extremadamente cuidadosos para sacar sin contaminación núcleos de los interiores de los meteoritos y realizar cultivos microbiólogos en condiciones estériles. Pero como hemos visto, los meteoritos son porosos y la contaminación es virtualmente inevitable. El microbiólogo soviético A. A. Imshenetskii, de la Academia de Ciencias Soviética, ha demostrado que meteoritos completamente esterilizados se contaminan con microbios incluso en lo más profundo de sus cuerpos si se dejan tan sólo un poco de tiempo en un estante. ≫ Hace pocos años, los científicos soviéticos Bairiev y Mamedov anunciaron a la prensa que habían "descubierto" una variedad especial de bacteria en el meteorito *metálico* Sichotz-Alinscii. Sin embargo, pronto se hizo patente que el "descubrimiento" carecía de valor como consecuencia de la naturaleza imperfecta de las investigaciones. ≪ Análogamente, en los Estados Unidos, Frederick D. Sisler, del Servicio Geológico, cultivó muestras obtenidas en el interior de condritos carbonáceos y halló que tras un largo período en condiciones estériles, teñido su caldo nutriente, aparecieron distintas variedades de microorganismos. Uno de ellos era un anaerobio facultativo, es decir, aunque era capaz de vivir en ausencia de oxígeno, demostró también preferencia para utilizar el oxígeno molecular. El único planeta en el cual se han detectado cantidades significativas de oxígeno es el nuestro. Está fuera de toda duda que un microorganismo extraterrestre podría haber desarrollado el complejo aparato de transferencia de electrones necesario para utilizar el oxígeno molecular sin pasar un largo período de evolución en un ambiente oxigenado. A pesar de lo poco, aparentemente conocidos microorganismos de Sisler, el hecho de que uno de ellos fuera un anaerobio facultativo es una prueba de peso de que en realidad se trata de contaminantes. ≫

¿Qué conclusiones podemos pues deducir de las sustancias orgánicas e inclusiones halladas en los meteoritos? Evidentemente, sería tentador decir que los condritos carbonáceos constituyen una prueba definitiva de que hay vida en otros planetas. Sin embargo, en la historia de la ciencia ha habido muchos otros casos en los que se aceptaron las respuestas que se querían y no porque se hubiera comprobado su exactitud, sino simplemente porque eran las que se esperaban. Hay un antiguo proverbio chino que dice: "El hombre que espera con anhelo la llegada de un amigo no debe confundir los latidos de su corazón con las pisadas de las pezuñas de un caballo que se acerque". La verdadera naturaleza de los meteoritos carbonáceos - tanto si en realidad contienen restos de una vida extraterrestre como si hay alguna otra explicación de la presencia de materia orgánica y de elementos organizados - es un problema cuya solución no se ha hallado todavía. ≪ Las dificultades, frustraciones, y polémicas científicas que esta cuestión ha engendrado son equiparables a las de las primeras investigaciones en busca de vida en Marte colocando en su superficie una nave no tripulada. De todos modos, la experiencia adquirida en el análisis de los condritos carbonáceos será de incalculable valor en otras investigaciones sobre vida extraterrestre. ≫

24

Vida en otros sistemas solares

. . . Y con todo, no es inverosimil que esos grandes y nobles cuerpos tengan algo de vida en ellos u otras formas de desarrollo, aunque muy distinta a la que vemos y disfrutamos aquí. Quizá sus plantas y animales tengan otra clase de nutrición.

Christiaan Huygens, *Nuevas Conjeturas respecto a los mundos planetarios, sus habitantes y producciones* (1670)

. . . Consideremos un gigante de dieciocho metros - más o menos la estatura de los gigantes Pope y Pagan de la ilustración de Pilgrim's Progress de mi niñez. Esos monstruos no sólo eran diez veces más altos que Christian, sino diez veces más anchos y otras tantas más gruesos, por lo que sus pesos totales eran mil veces más que el de éste, o sea, de 80 a 90 toneladas. Por desgracia las secciones transversales de sus huesos sólo eran cien veces las de los de Christian, por lo que cada centímetro cuadrado de los huesos de los gigantes tenía que soportar diez veces más peso que el centímetro cuadrado de hueso humano. Como el fémur humano se rompe con un peso de diez veces el del cuerpo, Pope y Pagan se los hubieran roto cada vez que hubieran dado un paso. Sin duda era por esto que estaban sentados en el dibujo que recuerdo. Pero esto no rebaja el respeto de Christian y de Jack al gigante asesino.

J. B. S. Haldane, *On being the Right Size* (1932)

≪ En los capítulos anteriores hemos considerado las propiedades de las estrellas, la probabilidad de que algunas de éstas tengan sistemas planetarios que los acompañen por el espacio, las condiciones necesarias para el origen y primitiva evolución de la vida y el alcance de los entornos planetarios en el que cabe concebir procesos biológicos. Vamos ahora a probar de recopilar estos resultados, tratar de especificar qué tipos estelares es probable que tengan planetas habitados y quizá incluso indicar cuáles de las estrellas más próximas son los candidatos más probables. Aun cuanto mucho de cuanto decimos concierne a la vida en general, teniendo presente el objetivo de la parte III del libro, consideraremos también al menos algunos criterios mínimos sobre el desarrollo de vida racional.

≪ En nuestro planeta han sido necesarios como mínimo varios cientos de millones de años para la evolución de los simples organismos unicelulares a partir de los materiales de la atmósfera primitiva y de los océanos. Si consideramos ese tiempo como valor indicativo, se deduce que los planetas de estrellas del tipo espectral anterior al AO no llevan en la serie principal el tiempo suficiente para la evolución protozoaria. (Véase la tabla V.)

≪ De nuevo por analogía terrestre, parece que se necesita un intervalo de tiempo todavía más largo ≫ para que las formas más simples de vida evolucionen a seres inteligentes ≪ capaces de desarrollar una civilización técnica ≫

La fuerza impulsora tras esta evolución es la selección natural de las mutaciones producidas aleatoriamente. Puede tener lugar un vasto número de mutaciones antes que una de ellas, por casualidad, contribuya al desarrollo de una forma de vida más avanzada. ≪ En nuestro planeta, este proceso ha sido como de unos tres mil millones de años. Si consideramos esta cifra como módulo, es probable entonces que las civilizaciones técnicas ≫ se hallen solamente en planetas dependientes de estrellas que lleven residiendo en la serie principal por lo menos varios miles de millones de años, es decir, estrellas del tipo espectral posterior al FO. (Véase en el capítulo 6, la tablaII.) El razonamiento de la rotación estelar (capítulo 13) ha sugerido que únicamente las estrellas del tipo espectral posterior al F2 van acompañadas de sistemas planetarios. En lo sucesivo, con una excepción, supondremos que todas las estrellas de la serie principal de tipo espectral posterior al F2 tienen sistemas planetarios.

La única excepción es las estrellas de primera generación - las subenanas (véase el capítulo 6), que contienen sólo cantidades despreciables de elementos pesados y que no es probable que tengan planetas como la Tierra. ≪ Sin embargo, pueden tener planetas del tipo jovial; como hemos visto en el

hayan entrado todavía en la serie principal, ≪ en cuyo caso no habrá pasado aún el tiempo suficiente para que se origine y evolucione la vida en los planetas del sistema. ≫

Para que una estrella tenga un sistema planetario habitable, la radiación que emita ha de mantenerse aproximadamente constante durante, quizá, miles de millones de años. ≪ Manteniéndose constantes los demás factores, un leve cambio porcentual de la luminosidad solar tendría efectos drásticos en la temperatura de la Tierra. (Capítulo 16.) ≫

La abrumadora mayoría de las estrellas de la serie principal son extraordinariamente constantes en su emisión de radiación. Los estudios geológicos indican que nuestro propio Sol no ha variado el procentaje de su luminosidad más que en unas pocas décimas ≪ en los últimos pocos cientos de millones de años. ≫ Sin embargo, existe una clase grande de estrellas variables cuyas luminosidades fluctuan considerablemente. ≪ No es posible, pues, que en esas estrellas haya sistemas planetarios habitables ≫

Entre otras cosas que tiene que satisfacer un planeta para albergar vida propia, están su masa y la composición química de su atmósfera. Como ya dijimos en el capítulo 16, estas dos características no son, evidentemente, independientes entre sí, ≪ Vimos que para una temperatura de la exosfera y campo gravitatorio planetarios determinados, los átomos más ligeros serían los que con preferencia se escaparían al espacio. Cuando la temperatura de la exosfera aumenta (debido, por ejemplo, a estar el planeta más cerca de su sol) o cuando disminuye la fuerza de gravedad (debido, por ejemplo, a que consideramos un planeta de poca masa), se acelera la velocidad de escape de todos los átomos.

≪ Para la masa, radio y temperatura de la exosfera de la Tierra, el hidrógeno tendría que escaparse en breves períodos de tiempo geológico, mientras que la tasa de escape del oxígeno sería insignificante en todo el tiempo geológico. Sin embargo, en la Luna, como su masa es mucho más pequeña que la de la Tierra, aunque la temperatura de su exosfera fuera la misma que la de la exosfera terrestre, los gases más pesados se habrían escapado ya en lo que tiene de vida el sistema solar. Así pues, cualquier hidrógeno residual en la atmósfera de la Tierra y cualquier atmósfera residual total en la Luna, se tienen que deber al aporte contínuo de atmósfera, probablemente procedente del interior de sus cuerpos. En ausencia de atmósfera, un planeta no puede mantener un océano de agua ni ninguna otra clase de líquido y estos o los gases muy densos, parece ser que son necesarios para la interacción molecular que da lugar al origen y evolución de la vida. Así pues, excepto para la bastante remota posibilidad de origen y evolución de vida subterránea para que un planeta sea habitable ha de tener atmósfera. ≫

Por otra parte, una masa planetaria muy grande, también puede ser un factor limitante. Por ejemplo, los planetas gigantes, Júpiter y Saturno conservan casi completamente sus atmósferas originales ricas en hidrógeno y helio. Si un planeta mantiene la composición original del medio a partir del cual se formó, su atmósfera de hidrógeno y helio tiene que ser muy densa. Es problemático que en un planeta así se forme una superficie dura. ≪ Si Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno son esferas completamente gaseosas cuyas densidades respectivas crecen rápidamente hacia el centro, o si en realidad tienen una corteza rocosa o de composición más o menos rocosa dentro de su atmósfera visible, es de momento una cuestión que no se sabe. ≫ Ya hemos indicado que si la masa de un planeta fuera 5 ó 10 veces mayor que la de Júpiter, no diferiría apreciablemente de una estrella enana. ≪ Hemos mencionado que la composición química de un planeta masivo de tipo jovial no excluye necesariamente el origen y desarrollo de la vida en él, aunque si implica que el carácter de su vida sería muy diferente al de la misma en la Tierra. ≫

Para que en un planeta aparezca la vida y se desarrolle, su masa tiene que estar comprendida entre ciertos límites. ≪ En un planeta cuya temperatura de exosfera fuera semejante a la de la Tierra, (unos 1500 K) y de masa 10 veces mayor que la de la Tierra, sería insignificante el escape de la atmósfera al espacio interplanetario durante el tiempo geológico. Si la masa fuera unas cuantas veces mayor que antes, se retendrían cantidades grandes de hidrógeno y la química planetaria sería altamente reductora y si la masa planetaria fuera como 2000 veces la de la Tierra, el "planeta" sería en realidad una estrella pequeña. Pero estos límites de masa para la habitabilidad - entre 0,1 y 2000 masas terrestres - son tan amplios que habría que incluir a todos los planetas. ≫

El hecho de que los planetas terrestres queden en la parte interior y más caliente del sistema solar y que los joviales, de composición reductora queden en la parte exterior y más fría, no es probablemente una simple coincidencia. ≪ Puede ser que los planetas de tipo terrestre se formen siempre en las regiones interiores de los sistemas solares, donde se facilita la pronta disipación de los gases más ligeros, es decir, del hidrógeno y el helio. Los planetas de tipo jovial tienden a contener los gases totalmente reducidos metano, amoníaco y vapor de agua, que son absorbentes muy eficaces en la radiación infrarroja. Así pues, los planetas joviales, en general, tienen efectos de invernadero muy eficaces, por lo que son de esperar temperaturas relativamente templadas, al menos, a cierto nivel de su atmósfera o nubes, aun cuando estén muy lejos de su sol.

≪ Con los criterios precedentes podríamos hacer algunas estimaciones sobre la habitabilidad probable de un planeta extraterrestre dado, si sólo tuviéramos cierta información respecto a ese planeta. Por desgracia, como ya vimos en el capítulo 11, el reconocimiento de planetas extraterrestres y la determinación de sus características, es algo que supera a nuestra actual capacidad. Estos datos los podrán proporcionar la nuevas técnicas astronómicas dentro de pocos años. Por tanto, todo cuanto podemos hacer, es vigilar las estrellas más próximas y estimar qué fracción de ellas tienen ecosferas apropiadas.

≪ Si aceptamos que los demás sistemas planetarios tienen siempre la misma distribución que el nuestro, obtendremos probablemente un límite

TABLA V

LAS VEINTE ESTRELLAS MAS PROXIMAS DE TIPO ESPECTRAL ENTRE F2 Y K5

Estrella	*Tipo espectral*	*Distancia en años luz*
α Centauri A	G2	4,3
α Centauri B	K4	4,3
ε Eridani	K2	10,8
61 Cygni A	K5	11,1
ε Indi	K5	11,3
τ Ceti	G8	12,2
70 Ophiuchi A	K1	17,3
70 Ophiuchi B	K5	17,3
η Cassiopeiae A	F9	18,0
σ Draconis	G9	18,2
36 Ophiuchi A	K2	18,2
36 Ophiuchi B	K1	18,2
HR 7703 A	K2	18,6
HR 5568 A	K4	18,8
δ Pavonis	G7	19,2
82 Eridani	G5	20,9
β Hydri	G1	21,3
p Eridani A	K3	21,4
p Eridani B	K2	22,0
	K2	22,0

más bajo que el número de estrellas próximas que es posible tengan planetas habitables. Hallamos entonces que las más próximas en orden de distancia al Sol, son las de la tabla V, en la que se dan las veinte más cercanas. Las denominaciones que empiezan por "HR" se refieren al Catálogo de Harvard Revisado. Hacemos hincapié en que la lista sería mucho más larga si incluyéramos las últimas enanas K y las M. Puesto que el número de estrellas próximas crece con el cubo de la distancia al Sol, la mayoría de éstas están entre los 17 y 22 años luz del Sol. Hemos incluído los componentes de los sistemas de estrellas múltiples que quedan dentro del intervalo de tipos espectrales, aunque existe la sospecha de que el proceso de formación de los sistemas de estrellas múltiples puede llevar inplícita la no formación de planetas.

≪ Si excluimos los sistemas de estrellas múltiples, vemos que las tres estrellas más próximas de interés biológico potencial son Epsilon Eridani, Epsilon Indi y Tau Ceti. Es lógico que cualquier investigación en busca de vida fuera de nuestro sistema solar empiece por estas estrellas. Si nos atenemos a las estrellas simples de tipo espectral parecido al del Sol - digamos

entre F5 y G5 - hallamos que las cuatro más próximas son Tau Ceti, Sigma Draconis, 82 Eridani y Beta Hydri. Si a pesar de las implicaciones de las puebas actuales, la formación de sistemas planetarios y el origen de la vida son sucesos raros, ninguna de las estrellas dadas en la tabla V tendría planetas habitados. En su lugar, las formas de vida más cercanas estarían a distancias mucho mayores, más allá de las estrellas próximas.

≪ La variación de los ambientes planetarios, incluso dentro de nuestro sistema solar, es sorprendente. La superficie sin aire y sin agua de nuestra Luna, está alternativamente muy caliente y muy fría. El lado nocturno de Mercurio, con una atmósfera muy ténue y sin sol para nada, mantiene sin embargo una temperatura moderada. Venus, con su atmósfera masiva, está a temperaturas que se acercan al rojo. Júpiter, con su densa atmósfera reductora, está muy frío en las nubes y probablemente muy caliente bajo ellas. La fuerza de la gravedad en las nubes de Júpiter es superior a 10 veces la que hay en la superficie de la Luna. Los entornos son variados; cada planeta y cada satélite son únicos. Podemos suponer que en otros sistemas solares la diversidad será aún mayor, aunque también pueden aparecer modelos generales. Es probable que la distinción entre planetas joviales y planetas terrestres sea universal.

≪ ¿Qué podemos decir acerca de las formas de vida que evolucionan en esos otros mundos? Hemos argumentado que los primitivos procesos químicos que dieron lugar al origen de la vida pueden ser semejantes en muchos mundos diversos, aun cuando esto está lejos de poderse comprobar. Pero es evidente que la posterior evolución por selección natural conduciría a una inmensa variedad de organismos; comparados con ellos, todos los organismos de la Tierra, desde los mohos a los hombres, han de guardar relaciones muy íntimas.

≪ En cada planeta hay tamaños límites para los organismos. Un organismo ha de tener el tamaño suficiente para efectuar el mínimo de funciones metabólicas necesarias para su replicación continuada. El organismo más pequeño que se conoce en la Tierra capaz de replicación independiente se denomina PPLO, de organismo semejante a pleuropneumonía (1). Es aproximadamente de 10^{-5} cm de tamaño. El límite superior al tamaño de los animales que habitan en el suelo se deduce de varios factores. Tal como subraya el epígrafe de Haldane a este capítulo, si un organismo es demasiado grande, no podrá soportar su propio peso. Una segunda limitación se refiere a la velocidad de transmisión de los estímulos por el sistema nervioso del animal. Si un animal es demasiado grande, una señal - por ejemplo, de los receptores de la luz, que diga: "Alto, delante mismo hay un precipicio" llegaría demasiado tarde a las lejanas patas para que estas obedecieran. Como solución parcial de este problema, los dinosauros tenían una extensa red neural en los cuartos traseros. Los animales grandes pueden subsistir

1.- N. del T. Del inglés. *Pleuropneumonia-like organism.*

si hay un medio vivaz que los soporte, como, por ejemplo, en los océanos o en una atmósfera muy densa.

≪ La mayoría de los organismos corrientes tienen dos, cuatro o seis patas, aunque hay adaptaciones a ninguna o a muchas, como las culebras (reptiles) o los ciempiés (miriápodos). No parece haber razón para que los organismos extraterrestres tengan un número determinado de patas o, en cuanto a esto, que no tengan ninguna. En otros medios ambientes, pueden haber llegado a otros sistemas especiales de motilidad. Efectivamente, a nivel protozoario, así es el caso, ya que para la propulsión biológica utilizan corrientemente flagelos, cilios e incluso una especie de propulsión a chorro.

≪ Cuanto mayor sea la gravedad del planeta, más pequeños serán los animales más grandes. En planetas con poca gravedad puede haber organismos que, desde nuestro punto de vista sean largos y delgados. Lo mismo, dicho sea de paso, puede aplicarse a la arquitectura de las civilizaciones extraterrestres avanzadas. Los mundos muy grávidos pueden tener estructuras bajas y rechonchas; los ligeros, al menos permiten formas más delicadas.

≪ En el capítulo 16 hemos mencionado que quizá en otros mundos no haga falta la respiración y que pueden hallarse formas bastante avanzadas incluso en ambientes reductores. El tamaño de los organismos que respiran también está limitado por el sistema respiratorio. No hay insectos de más de treinta centímetros, porque estos introducen el oxígeno de sus cuerpos por difusión, que es un proceso mucho más lento y menos eficaz que el de la circulación de la sangre.

≪ El número de posibles receptores sensorios en los organismos extraterrestres es aparentemente limitado. En planetas con atmósfera bastante extensa u océanos, tienen que ser muy útiles los receptores sensorios para el análisis químico directo de las moléculas de la atmósfera o del océano. Aunque sería posible una variedad de métodos bioquímicos, estos sentidos serían aproximadamente equivalentes a los nuestros del gusto y del olfato. La utilidad del sentido del oído depende de la composición y temperatura de la atmósfera que determinan la velocidad del sonido. Los receptores de presión, como nuestro sentido del tacto, parece que son de utilidad en cualquier ambiente.

≪ El medio más eficaz de percibir los objetos distantes es la recepción de radiación electromagnética. Dado que la velocidad de la luz es tan grande, el tiempo de propagación en una superficie planetaria es despreciable. Casi todas las estrellas interesantes emiten el grueso de su radiación en lo que denominamos parte visible del espectro. En general, deberíamos esperar que hubiera más luz visible reflejada que de cualquier otra frecuencia. Además, la parte visible del espectro está en el intervalo de longitudes de onda que es menos probable la absorban los constituyentes atmósfericos. Las transiciones de electrones en los gases atmosféricos dan lugar a la absorción de luz en el ultravioleta; las vibraciones de las moléculas ocasionan la absorción en el infrarrojo y la rotación de las moléculas la absorción en el infrarrojo a longitudes de radio cortas. Así pues, por razones físicas fundamentales, el intervalo de luz visible es una "ventana" transparente en todas las atmósferas planetarias. En general, tendría que encontrarse otra ventana a longitudes de radio largas, más allá de los 3 cm. Sin embargo, hay una dificultad principal para imaginar organismos que "vean" con radioondas. Para tener una resolución útil, es decir, reconocer sutiles detalles visuales, la superficie colectora eficaz tiene que ser enorme. Para tener el mismo poder de resolución a longitud de onda de 5 cm que el ojo tiene a longitud de onda de 5000 Å, el "globo del ojo" de microondas extraterrestres tendría que tener unos 800 metros de diámetro, lo cual parece un poco difícil.

≪ En los organismos terrestres, los sentidos visuales se emplean principalmente para observaciones con luz solar reflejada. Hay algún que otro caso de animales que emiten luz visible, como ciertos animales marinos y las luciérnagas. La hembra de esta especie "pestañea" seductoramente al macho. Por otra parte, sobre todo en mundos que no se utilice la propagación del sonido (debido, por ejemplo, a una atmósfera muy enrarecida), podemos imaginar los más complicados medios de comunicación por propagación electromagnética, probablemente de luz visible, pero no necesariamente. Si una especie así se comunicara por radioondas, a pesar de la escasa resolución concurrente, probablemente le atribuiríamos percepción extrasensorial, aunque conviene hacer ver que sólo es "extrasensorial" porque nosotros carecemos de ella. Tal adaptación puede estar basada perfectamente en principios físicos del sonido. Hay ciertas pruebas de que los seres humanos pueden percibir las emisiones de radar de alta intensidad, aunque, de momento, se desconoce el mecanismo a que esto obedece.

≪ Un ojo de resolución bidimensional; dos ojos, conjuntamente, resolución tridimensional. Tres ojos no representan, ni aproximadamente, la misma perfección sobre dos, que dos sobre uno, pero puesto en la nuca, por ejemplo, el tercer ojo podría servir para algo. Parece que algunos animales del Mesozoico tuvieron tres ojos - los tres en la frente - y algunos fisiólogos creen que la glándula pineal humana es el vestigio residual de un tercer ojo en el centro de la frente. Hay algunas imágenes de Buda que lo representan con ese tercer ojo.

≪ Los medios para la adquisición, reprocesamiento y excreción del alimento, probablemente variarán mucho de un mundo a otro, según la naturaleza de la cadena alimenticia y la relación entre los distintos organismos. No parece que haya razón para suponer por otra parte la misma combinación de funciones que en la Tierra, donde se hallan combinados hasta cierto grado los órganos vocales, respiratorios y auditivos, así como los de excreción y reproducción. En otra parte pueden prevalecer combinaciones distintas de las funciones.

≪ Ni siquiera esta breve y a modo de ensayo excursión ecológica extraterrestre se puede comprobar hasta que obtengamos muestras de organismos extraterrestres. No obstante, estas simples consideraciones son de utilidad, porque vierten luz sobre las ventajas selectivas de las formas y funciones de los organismos terrestres. ≫



Vida racional en el Universo

12/31/56

"¿Quieres saber cómo acaba?"

"Lo siento, hijito, se nos han acabado los caramelos"

De noche, en el cielo, las luces van y vienen. Los hombres, preocupados al final por las cosas que hacen, caen rendidos y sueñan pesadillas, o permanecen despiertos mientras los meteoros susurran lozanamente en lo alto. Pero en ninguna parte del espacio ni en miles de mundos habrá hombres que compartan nuestra soledad. Pueden ser sabios; pueden ser poderosos; en algún lugar del espacio instrumentos formidables maniobrados por extraños órganos manipulantes pueden mirar con asombro nuestro celaje flotante, envejeciendo sus amos lo mismo que envejecemos nosotros. Sin embargo, en la naturaleza de la vida y en los principios de la evolución hemos tenido nuestro cometido. De los hombres de otros lugares y más allá, no habrá nada por siempre jamás.

Loren Eiseley *"The Immense Journey"* (1957)

25

El reconocimiento de la mediocridad

. . . Lo que me hace de esta opinión, de que esos mundos no están sin esa criatura investida de razón, es que de lo contrario, nuestra Tierra tendría gran ventaja sobre ellos al ser la única parte del universo que pudiera vanagloriarse de tal criatura . . .

Christiaan Huygens, *"Nuevas conjeturas respecto a los mundos planetarios, sus habitantes y producciones"* (1670)

. . . la parte inteligente de la creación se introduce en el ámbito de unos pocos años, en el curso de miriadas de edades. ¿Por qué no en el ámbito de unos pocos miles en el espacio de los sistemas?

William Whewell, *Pluralidad de mundos* (1854)

La vida, incluso la celular, puede hallarse allá en la oscuridad. Pero de naturaleza alta o baja, no tiene la forma del hombre. Esta es un producto evolucionario extraño y largo viaje errante por la buhardilla del hogar forestal y tan grandes son los riesgos de fracaso que nada precisamente e idénticamente humano es probable vuelva a pasar por el mismo tránsito.

Loren Eiseley. *The Immense Journey* (1957)

≪ ¿Existen otros seres inteligentes en el universo? ¿Está llena la Galaxia de mundos civilizados, distintos e inimaginables, floreciente cada uno de ellos con su propio comercio y cultura, propicios a sus distintas circunstancias? ¿O puede ser que estemos solos en el universo; que por una broma mordaz y malhadada, sea la nuestra la única civilización existente?

≪ La idea de que no somos únicos ha resultado ser una de las más provechosas de la ciencia moderna. Los átomos que se hallan en la Tierra son de la misma clase que los de una galaxia distante 5 mil ó 10 mil millones de años luz. Tienen lugar las mismas reacciones y las mismas son las leyes de la naturaleza que rigen sus movimientos. La afirmación formal que resume la atracción entre dos esferas masivas de plomo en un laboratorio terrestre, puede ser de utilidad para predecir con exactitud los movimientos de las estrellas binarias o la órbita de la Luna. Una de las mayores revoluciones intelectuales del Renacimiento, por la que lucharon Copérnico y Galileo y por la que perdió la vida Giordano Bruno, fue la idea de que la Tierra no era sino uno de los muchos planetas de nuestro sistema solar y del más allá. ≫

La fuerza de esta idea, ≪ el reconocimiento de nuestra propia mediocridad, el convencimiento de que nuestros entornos son más o menos iguales que cualquier otra región del universo ≫ lo ha puesto de manifiesto el astrónomo alemán Sebastian von Hoerner en el Observatorio Radioastronómico Nacional de los Estados Unidos. Los antiguos griegos desconocían la verdadera naturaleza de las estrellas y la escala del universo. ≪ Algunos pueblos incultos creen que las estrellas son faroles que cuelgan de la bóveda celeste o agujeros en la armadura celestial a través de los cuales se ve el fuego que arde más allá. El que las estrellas son soles distantes es una idea más fuerte y más astuta. ≫ Pero en principio, los griegos podían haber determinado las dimensiones del sistema solar y las distancias a las estrellas.

Supongamos que la Tierra es un planeta vulgar y que el Sol es una estrella cualquiera; en ese caso, el diámetro de la Tierra, su distancia al Sol y su albedo o reflectividad, serán los característicos de los planetas en general. Como los griegos conocían ya las dimensiones aproximadas de la Tierra (Eratostenes había realizado un cálculo en esencia correcto, la comparación del brillo aparente de los cinco planetas que entonces se conocían con el brillo aparente del Sol, permite el cálculo de la distancia de la Tierra al Sol. El valor que se obtiene de esta forma es aproximadamente el duplo del valor real.

Si supusiéramos que las diez estrellas más brillantes del cielo son soles como el nuestro y si supiéramos cuanto más brillante que esas estrellas

aparece el Sol, sería posible calcular *sus* distancias a la Tierra en función de la que hay del Sol a la Tierra. Y con el valor de la unidad astronómica obtenida a partir del brillo aparente de los planetas, los griegos de la antigüedad podían haber estimado la distancia media entre las estrellas con un error de tan sólo un 10%.

≪ En el siglo XVII, Christiaan Huygens intentó en realidad este cálculo. Construyó una lámina metálica que podía eclipsar artificialmente la imagen del Sol y punzonó en ella una serie de agujeros, cada vez más pequeños, hasta el menor a través del cual la luz solar no parecía tener más brillo que la estrella Sirius. Huygens determinó que el diámetro angular de ese agujero era, más o menos 1/28000 el del Sol. Admitiendo que Sirius y el Sol tienen el mismo brillo intrínseco, Huygens dedujo que aquélla estaba a $2{,}8 \times 10^4$ veces más lejos de la Tierra que el Sol. Puesto que la unidad astronómica es aproximadamente igual a $1{,}5 \times 10^{13}$ cm, Huygens llegó a la conclusión de que Sirius estaba, en efecto, a $4{,}2 \times 10^7$ cm o a unos 0,45 años luz. El valor correcto es casi 20 veces superior. La discrepancia estriba principalmente en la adopción de Huygens de la suposición de la mediocridad: Sirius, una estrella enana del tipo espectral A1, tiene una luminosidad intrínseca que es unas 60 veces mayor que la del Sol. ≫

Así, aunque estas estimaciones no tienen más que caracter probabilístico, la suposición de la mediocridad dará en muchos casos un resultado bastante válido cuando tras la capacidad actual de la ciencia haya una justificación científica detallada.

≪ Sin embargo, la aplicación de este método a campos de los que apenas sabemos nada, es en esencia un acto de fe. Por ejemplo, un ejercicio que desarrollaremos luego, es estimar las probabilidades del origen de la vida en un sistema planetario adecuado, el origen de seres inteligentes, el origen de la civilización técnica, etc. Estos cálculos, implícita o explícitamente, se basan en la experiencia terrestre, aunque es arriesgado extrapolar a partir de un ejemplo. Es por esto, por ejemplo, que el descubrimiento de vida en otro planeta - digamos Marte - puede, según palabras del físico americano Philip Morrison, del Instituto Tecnológico de Massachusets, "transformar el origen de la vida de milagro a estadística".

≪ Para el origen de los seres racionales y de las civilizaciones técnicas el hallar otro ejemplo puede ser aún más difícil que la detección y descripción de vida en Marte. Hemos de reconocer la posibilidad de que incluso con tantos como 10^{22} planetas en el universo accesible, la probabilidad de que uno de ellos tenga una civilización técnica puede ser de 10^{-22} o menos. Podemos intuir que la probabilidad tiene que ser mayor, pero *no lo sabemos*. Evidentemente, la determinación de esas probabilidades es una de las motivaciones principales de la búsqueda de vida racional extraterrestre.

≪ Otra cuestión de gran importancia para nuestros días y cuyo interés no se limita sólo a los científicos es esta. ¿Tienden las civilizaciones técnicas a destruirse poco después de que logran la comunicación estelar por radio? El establecimiento de contacto interestelar por radio puede permitir calcular tal probabilidad.

≪ Como ejemplo de las dificultades inherentes al establecimiento a priori de las probabilidades, consideremos la cuestión del origen de la vida racional en la Tierra. Hemos hecho hincapié en que la evolución es oportunista, no prevista. Tenemos cinco dedos en cada mano y en cada pie y no, creemos por eso que cinco sea una ventaja intrínseca en comparación a cuatro o seis, sino porque hemos evolucionado a partir de un predecesor devoniano, un anfibio con cinco huesos homólogos a nuestras falanges actuales. Este ejemplo es trivial para la cuestión del origen de seres racionales; pero supongamos que tuviéramos algún patrimonio evolucionario que no fuera no importante, sino más bien *perjudicial* para el perfeccionamiento de la inteligencia - alguna característica tan profundamente asentada, tan íntimamente tejida en la tela de la vida, que no fuera probable el progreso de la inteligencia. Seguramente, no se alcanzan todas las adaptaciones concebibles, ni siquiera aunque puedan tener gran valor selectivo. Por ejemplo, en la Tierra no hay organismos que hayan desarrollado huellas de tractor para la locomoción, a pesar de la utilidad de éstas en algunos medios ambientes. La improbabilidad de lograr esa adaptación por lento proceso evolutivo tiene que preponderar sobre la ventaja adaptativa potencial.

≪ Nos podríamos preguntar si el desarrollo de la inteligencia humana fue un suceso fortuito. La inteligencia en sí, surgió pronto y el desarrollo de las capacidades para utilizarlas como instrumentos evolucionó con los pájaros y los primates no humanos. Pero las circunstancias ecológicas que rodean la evolución del ser humano contemporáneo se desconocen en esencia. Algunos antropólogos creen que las comunidades humanas surgieron en respuesta a la inclemencia de los últimos tiempos del Plioceno y del Pleistoceno, quizá por recesión de los bosques en que habían vivido las comunidades prehumanas o quizá debido a que el nuevo clima frío puso otra condición sobre los nuevos hábitos del vestir, comer y morar. Y si no hubiera habido hielos del Pleistoceno . . . ¿se habría desarrollado el ser racional en la Tierra?

≪ Algunos científicos se han impresionado grandemente por los numerosos sucesos sueltos distintos que en conjunto son responsables del desarrollo del hombre y de su inteligencia. Han recalcado que incluso si la Tierra empezara de nuevo desde el principio, interviniendo únicamente los factores aleatorios, sería muy remota la probabilidad de que apareciera algo como un ser humano. Y otros han quedado impresionados del gran valor selectivo de la inteligencia. Mientras no utilicemos la inteligencia para autodestruirnos, ésta y la civilización que le acompaña ahora, se cuentan entre los progresos más significativos en la historia de la vida en la Tierra. Hemos ocupado todos los habitats, dominado o destruido a todos los competidores y predadores y algunos de nosotros han salido ya de los confines terráqueos en viajes a la Luna. Aun cuando no sea probable el desarrollo de seres humanos - o de sus equivalentes anatómicos extraterrestres, los humanoides ¿no podría ser el

desarrollo de sus equivalentes intelectuales un acontecimiento evolutivo penetrante?

≪ El desarrollo de la inteligencia y de la civilización técnica ha tenido lugar hacia la mitad del camino de residencia de nuestro Sol en la serie principal. Si tuviéramos que extrapolar a partir de un ejemplo aplicando la suposición de la mediocridad, llegaríamos a la conclusión de que en todos los planetas en que la vida florece desde hace varios miles de millones de años existe gran probabilidad de que se desarrolle el ser humano y la civilización técnica. Pero esto, en el mayor de los casos, es un argumento plausible; no conocemos los factores determinados que intervienen en el desarrollo del hombre y de su civilización. ≫

Puede parecer pues, que este libro trata de un problema no resuelto, sino irresoluble. ¿Se le puede en realidad llamar "científico" a un libro que trata de la vida racional en el universo? ≪ Estamos profundamente convencidos que el problema se puede plantear formalmente únicamente si las hipótesis que intervienen se establecen explícitamente y se aprovecha al máximo el método científico. Aun entonces, no llegamos a muchos resultados finales, si bien la formulación de los problemas tiene en sí significado e interés.

≪ Un enfoque concebible es suponer que a lo largo de la Galaxia existen civilizaciones en varios estados de desarrollo histórico y ver luego cuáles son las consecuencias de observación que esto implica. La humanidad es relativamente joven; nuestra civilización está en la infancia. Los homínidos habitan la Tierra desde hace un 0, 1% de su historia; nuestra civilización hasta el presente sólo ha soportado una millonésima del tiempo de vida de la Tierra; la civilización técnica, en el sentido de capacidad para la comunicación interestelar por radio, sólo lleva existiendo una mil millonésima del tiempo geológico. Salta pues a la vista que si hay civilizaciones en los planetas de otras estrellas, tienen que estar, en general, mucho más avanzadas que la nuestra. El si ese avance abarca los aspectos social, científico, artístico o técnico, u otros aspectos que ni siquiera podemos imaginar, es difícil pronosticarlo. Pero el establecer contacto con una civilización extraterrestre evoca, de forma exagerada, algunos de los mismos problemas a que se hubiera enfrentado la tripulación de una piragua de algonquinos (1) transportada milagrosamente a la contemporánea bahía de Nueva York formada por el estuario superior del río Hudson. ≫ Parece una tarea imposible el predecir el progreso de la sociedad a miles de años vista o más. Los historiadores procuran evitar estos problemas; ≪ bastantes dificultades tienen para entender el pasado sin necesidad de profetizar el futuro. ≫ No obstante, creemos

1.- N. del T. Estos algonquinos no tienen nada que ver con la época del precámbrico superior, comprendida entre el arcaico y el cámbrico, hace de 800 a 500 millones de años. Se trata de una tribu de indios pieles rojas indígena del Canadá y Este de los EE.UU., que habitaba desde Virginia, al Este del Mississippi, hasta la bahía de Hudson y llanuras del Canadá antes de la llegada de los europeos.

que pueden sentarse algunas regularidades y tendencias generales respecto a la evolución de las civilizaciones.

Juzgando por nuestro único ejemplo, existe una peculiaridad importante de las formas avanzadas de los seres racionales: se esfuerzan en el gobierno activo del universo. El hombre ya se ha aventurado fuera de la Tierra y dado sus primeros pasos hacia la remodelación del sistema solar. En el capítulo 34 se tratarán, pero a escala mucho mayor, las posibles influencias en la Galaxia de la vida racional. Durante miles de millones de años, la Tierra ha tenido un solo satélite; ahora ≪ los tiene a miles. ≫ Los satélites artificiales son, claro está, pequeños y, con todo, mayores que los diminutos de Saturno que forman sus notables anillos. Nuestra civilización podría establecer un anillo artificial alrededor de este planeta; proeza de ingeniería que parece posible dentro del alcance tecnológico contemporáneo. De momento no se le ve utilidad a ese anillo, pero si la tuviera, podríamos hacerlo en unas cuantas décadas. ≪ En realidad, el mantener en órbita un cinturón de pequeñas agujas hace unos años por la Fuerza Aérea de los Estados Unidos, en una operación llamada "Proyecto Westford" demostró la viabilidad de una empresa así. ≫

En el capítulo 18 dijimos que debido a las actividades del hombre la temperatura de brillo de la Tierra en el medidor de longitudes de onda había aumentado un millón de veces en los últimos dos o tres decenios. El ser racional ha hecho de nuestro pequeño planeta el segundo en importancia como radiofuente del sistema solar. Está totalmente dentro de lo posible que en las próximas décadas nuestro planeta se convierta - al menos a veces y a algunas frecuencias - en una radiofuente tan poderosa como el Sol.

En el capítulo 28 veremos que, en principio, se puede crear una situación análoga a frecuencias ópticas. El desarrollo de los generadores de quantos de radiación óptica - los lasers - abre la posibilidad de enviar estrechos haces de luz casi monocromática a las vastas distancias interestelares. A frecuencia y dirección determinadas, la intensidad de la emisión desde la Tierra puede exceder en mucho a la del Sol.

Estos son sólo unos pocos ejemplos de las manifestaciones cósmicas de vida racional que se pueden predecir por meras extrapolaciones de la tecnología existente. ¿Y qué vendrá luego? No es fácil pronosticar el curso específico de la influencia activa de la vida racional en el universo, pero las tendencias del progreso están bien patentes. ≪ Si en el universo hay muchas civilizaciones técnicas, basta con que una pequeña fracción de ellas tenga la misma urgencia de expansión y dominio que la nuestra, para que haya una remodelación al por mayor del universo.

≪ Cuando pretendemos pronosticar los aspectos más generales de la sociedad inteligente en el futuro lejano, digamos, a millones de años, no basta con las modestas extrapolaciones de la tecnología existente. Tendríamos que restringirnos a lo que es posible materialmente aunque bajo un punto de vista científico esté mucho más allá de nuestras figuraciones. Pero para escalas de tiempo de millones de años, hasta este procedimiento es

irremediablemente modesto. Sin duda que se descubrirán nuevos principios científicos y nos es imposible pronosticar su naturaleza y hasta su aplicación. Quizá un signo de civilización muy avanzada será la renuncia al ansia de expansión y dominio; quizá un signo de civilización verdaderamente avanzada será el abandono voluntario de la persecución técnica para dedicarse a otras actividades. En la edición rusa de este libro, Shklovskii expresa la esperanza de que los "filósofos marxistas se interesarán más por el problema de las predicciones a gran escala del futuro de la humanidad" y se lamenta de haber puesto por delante sus ideas porque no es un especialista del augurio científico. Pero en este tema no hay especialistas y quizá ni siquiera exista el tema, ≫ aunque al menos, los errores cometidos ahora darán ánimos para discusiones más fructíferas en el futuro.

En la parte III que resta tocaremos numerosos problemas. Primero, consideraremos un análisis de algunos modos de reconstrucción posible del cosmos por seres racionales. Como ejemplos (a lo mejor no del todo hipotéticos), consideraremos los problemas de las lunas de Marte y la hipótesis de la esfera de Dyson. Consideraremos luego un amplio margen de modos posibles por los cuales se puede entablar contacto con seres racionales extraterrestres. Algunos de los capítulos de la parte III contienen cálculos matemáticos que pueden suponer cierta dificultad al lector, en general. No obstante, son necesarios para poner de manifiesto algunas de las conclusiones deducidas ≪ Dado que esta fase del tema es tan nueva, no es posible hacer referencias a otras obras clásicas. Hemos procurado llevar el análisis de forma tal que se puedan suprimir los detalles de los cálculos sin que influyan principalmente en la comprensión de los aspectos más importantes. A este respecto, los detalles matemáticos que no son esenciales van impresos con letra de cuerpo menor. ≫ El material de estos capítulos es nuevo y, hasta cierto punto, inédito.

26

¿Son satélites artificiales las lunas de Marte?

. . . Ni tiene (Marte) ninguna luna que le rinda homenaje y en que . . . tiene que reconocerse inferior a la Tierra.

Christiaan Huygens, *Nuevas conjeturas respecto a los mundos planetarios, sus habitantes y producciones* (1670)

Rotunda la desintegración de ese colosal naufragio, infinito y puro. Las solitarias y allanadoras arenas se extienden muy lejos.

Percy Bysshe Shelley, *Ozymandias*

Las dos lunas de Marte se cuentan entre los objetos más intrigantes del sistema solar. El primero que sugirió su existencia fue el escritor satírico inglés Jonathan Swift. En su obra *Los viajes de Gulliver*, publicada en 1726, más de 150 años antes de que se descubrieran los satélites marcianos, Swift describe por boca de Gulliver las actividades científicas del reino de Laput, una isla habitada del cielo. En el capítulo III de la parte III, por boca de Gulliver, aparece la siguiente curiosa descripción:

> Han descubierto (los astrónomos laputianos) de esa suerte dos estrellas menores o satélites que giran en torno a Marte, de las cuales la más interior dista del centro del planeta primario tres veces su diámetro, y cinco la más exterior; la primera gira en el espacio de diez horas y la otra en veintiuna y media; así, pues, los cuadrados de su periodicidad están muy próximos, en proporción a los cubos de su distancia, del centro de Marte, lo que demuestra, evidentemente, que están regidas por la misma ley de gravitación que influye sobre los demás cuerpos celestes.
>
> Han observado noventa y tres cometas . . .

≪ Voltaire, en su novela interplanetaria *Micromegas*, aparecida en 1752, se hizo eco de este descubrimiento laputiano. ≫

La descripción de Swift del número de lunas de Marte, de sus periodos de revolución y de sus distancias al planeta está misteriosamente cerca de la verdad. Se ha hablado mucho de cómo pudo llegar Swift a su pronóstico y parece ser que no todo fue fruto de la fantasía; en cierto sentido, su descripción está basada en las ideas astronómicas que prevalecían en su época. Se sabía, desde luego, que la Tierra tenía una luna y se creía que Júpiter tenía cuatro. (En los tiempos de Swift sólo se habían descubierto los cuatro satélites galileanos; ahora sabemos que el planeta gigante tiene doce lunas, muchas de las cuales sólo pueden observarse con los telescopios más grandes.) Como Marte está situado entre la Tierra y Júpiter, la idea de que hubiera una progresión geométrica en el número de satélites para los planetas más distantes pudo llevar a Swift a la deducción de que Marte tenía dos lunas. Hemos de tener presente que entonces se aceptaban ampliamente las ideas de Pitágoras sobre la armonía de los números.

Swift creía, probablemente, que las lunas eran pequeñas porque ningún astrónomo laputiano las había detectado todavía. Pudo haber razonado que estaban cerca de Marte porque incluso los satélites más pequeños se podrían detectar si estuvieran a distancia suficiente de su primario. En cambio, muy cerca, habrían quedado ocultos en la luz dispersa del Planeta. ≪ La propor-

cionalidad entre el período de revolución de estos satélites alrededor de Marte y la potencia 3/2 de su distancia al centro de Marte, es simplemente una expresión de la tercera ley de Kepler, la cual, junto con su deducción de la teoría de la gravitación de Newton, se conocía bien en la época de Swift. ≫

Las lunas de Marte las descubrió en realidad el astronomo americano Asaph Hall en 1877, poco después de terminado el gran telescopio refractor del Observatorio Naval de los Estados Unidos. Desde entonces se han observado repetidamente, sobre todo cuando Marte está en oposición. La más alejada de las dos lunas se llama Deimos y está aproximadamente a 23000 km del centro del planeta. La más próxima es Phobos, distante unos 9300 km. ≪ Phobos y Deimos significan en griego, respectivamente, "terror" y "temor", que eran dos de los cuatro escuderos de Ares, dios de la guerra. ≫

El período de revolución de Deimos alrededor de Marte es de 30 horas, 18 minutos; el de Phobos, cada 7 horas, 39 minutos. Así pues, Swift predijo el período de revolución de éste dentro del 25% y el de aquél dentro de un 40% de sus valores verdaderos, que son predicciones más que notables. El período de rotación de Marte sobre su eje es de 24 horas, 37 minutos y 23 segundos. Así, si prescindimos de los satélites artificiales de la Tierra, Phobos es la única luna conocida del sistema solar con un período de revolución alrededor de su planeta, que es menor que la propia de éste sobre su eje. Por esta razón, los futuros exploradores de Marte podrán ver salir a Phobos por el oeste del cielo marciano y ponerse por el este; el período aparente de su revolución es de 11 horas.

≪ En las primeras décadas de este siglo, el autor inglés Edgar Rice Burroughs publicó una serie de novelas marcianas basadas en las aventuras de un tal John Carter, virginiano transportado milagrosamente a Barsoom (como llamaban a Marte sus habitantes). Los escenarios marcianos estaban inspirados en gran parte en las especulaciones de Percival Lowell que sirvieron para imbuir sus ideas en las mentes de toda una generación sobre los entornos de Marte.

≪ Entre otras ideas preconcebidas que incluso hoy día son a veces difíciles de desterrar, Burroughs pobló a Marte con una raza inteligente de seres humanos indígenas, que respiraban una atmósfera de oxígeno, que vivían en los fondos de los océanos secos desde hacía mucho y que bebían agua bombeada por el primoroso sistema de canales de Lowell. Una de las frases de Burroughs "debajo de las lanzadas lunas de Barsoom" da la impresión de que Phobos y Deimos, vistos por un observador en Marte, se mueven rápida y perceptiblemente por la noche en el cielo. En realidad, a Phobos le llevaría unas cinco horas y media el aparecer por el oeste, culminar por el zenit de un lugar y ponerse por el este. Los que hayan seguido el movimiento de los satélites artificiales (cuyos períodos comparables son de unos 50 minutos) pueden atestiguar que ese movimiento es casi imperceptible. ≫

Si el período de revolución de un satélite fuera exactamente igual al de rotación del planeta, observado desde éste, esa luna aparecería fija en el cielo y nunca se podría ver desde el hemisferio opuesto al lugar de observación. ≪ (Esas órbitas sincronizadas son la base del sistema de comunicación por satélites SYNCOM de los Estados Unidos, en el cual, tres satélites colocados en órbitas síncronas pueden dar la vuelta a la Tierra a la misma velocidad que ésta gira sobre sí misma, de modo que cualquier localidad de la Tierra puede estar en comunicación visual directa con uno de los satélites y cada uno de estos siempre a la vista directa de los otros dos.) ≫ El período de revolución de Deimos alrededor de Marte es casi igual que el de la rotación planetaria. La duración del "mes" de Deimos, de Deimos nuevo a Deimos nuevo, es de unas 132 horas. ≪ El mes correspondía a la lunación aunque luego, por comodidad, se modificó su duración. Se podría tratar de inventar nuevos nombres para los "meses" de los satélites de otros planetas; no obstante, como también se llaman lunas en sentido genérico, nos abstendremos de luchar con barbarismos tan espléndidos como "deimoción" o "foboción". ≫ Las órbitas de ambos satélites marcianos están en el plano ecuatorial del planeta y son casi circulares. La excentricidad de la órbita de Phobos es de 0,017 y la de Deimos de 0,003. ≪ Una circunferencia perfecta no tiene excentricidad; cuanto mayor sea ésta, más alargada es la órbita. ≫ Los ángulos de inclinación, es decir, los que forman las órbitas de los satélites con el plano del ecuador marciano, son aproximadamente de 2' y 1', respectivamente.

Durante una oposición media de Marte, las magnitudes "estelares" aparentes de Phobos y Deimos son, respectivamente, +11,5 y +13. Así, si no fuera por su proximidad al planeta, podrían verse fácilmente desde la Tierra con un telescopio de alcance moderado. ≪ Esta dificultad para detectarlos es la misma que vimos en el capítulo 11 cuando considerábamos la probabilidad de detección fotográfica de planetas en las estrellas próximas. ≫

De momento, no se pueden medir las dimensiones angulares de las dos lunas (y, por tanto, tampoco sus dimensiones reales) por observación directa desde la Tierra porque sus diámetros son tan pequeños, pero hay un método indirecto que nos permite obtener sus valores aproximados, ≪ Sabemos con suficiente exactitud a qué distancia de nosotros y del Sol se encuentran las lunas; podemos medir sus brillos y deducir las magnitudes aparentes como explicamos antes. ¿Por qué son tan brillantes como en realidad son? Por su reflectividad o albedo y por su tamaño. Cuanto mayor sea el albedo y más grandes sean, más brillantes tienen que ser. Por tanto, si damos un valor al albedo de los satélites, podemos deducir sus tamaños. ≫ Si suponemos que tienen el mismo albedo que Marte (como un 15%, en el visible), se puede calcular que Phobos tiene un diámetro de unos 16 km y Deimos quizá de 8 km. ≪ Si los satélites tienen albedos comparables con el de la Luna o el de Mercurio (que son como la mitad del de Marte), resultan entonces unos diámetros algo mayores. ≫ Phobos y Deimos son, pues, las dos lunas más pequeñas que se conocen en el sistema solar. Sin embargo, convendría

consideráramos que si cerca de Júpiter, Saturno o los otros planetas joviales existen planetas de tales dimensiones, no los podemos detectar por ahora.

Para un observador en Marte, Phobos sería un objeto celeste brillante de disco bien destacado. Su diámetro angular se aproximaría a los 10 minutos de arco, es decir, la tercera parte del tamaño del disco lunar visto desde la Tierra, y su luminosidad sería como un 4% la de nuestra Luna; más que suficiente para proyectar sombras en la noche marciana. Deimos, más distante de su primario, se parecería mucho a una estrella brillante, quizá diez veces más brillante que Venus tal como se ve desde la Tierra.

Lowell notó que ninguna de estas lunas tenía el color rojo característico del propio Marte, observación confirmada luego por otros observadores. ≪ En el capítulo 19 hemos visto que ese color rojo se debe probablemente a grandes cantidades de limonita, que es además el mineral que explica el albedo planetario. Parece, pues, claro, que la composición química de las superficies de Deimos y Phobos difiere de la de Marte. El albedo de los satélites no necesita por tanto ser forzosamente el mismo que el de Marte, hecho del cual se deducen las incertidumbres que intervienen en el cálculo de los diámetros. Si inicialmente estas lunas tuvieron una composición semejante a la de Marte, posteriormente tuvieron que ocurrir diferenciaciones. Por ejemplo, la atmósfera marciana es lo suficientemente gruesa para absorber los protones del viento solar que inciden en ella, cosa que no ocurre en los satélites que carecen de atmósfera y los protones que incidan lo harán contra las superficies y las decolorarán igual que han descolorido nuestra Luna. (Véase el capítulo 21.) Como veremos, pueden también ser otras las causas de la diferente composición. ≫

En 1945, el astrónomo americano B. P. Sharpless, ≪ observando en el mismo Observatorio Naval en que Hall descubrió los satélites de Marte, ≫ detectó una curiosa peculiaridad en el movimiento de Phobos. Comparando una serie de observaciones antiguas hechas por Hermann Struve con otras más recientes, notó que la velocidad orbital de Phobos está aumentando. La magnitud de su aceleración es pequeña, pero por sus cálculos, aparentemente real. (Véase la figura 26-1.) ≪ En el caso de Deimos las pruebas de esa aceleración fueron menos claras. Si llamamos ω a la velocidad angular de Phobos alrededor de Marte y $\Delta\omega$ a la variación de esa velocidad en cierto intervalo, $\Delta\omega/\omega$ será entonces la variación relativa de la velocidad angular en ese mismo período de tiempo. ≫ Según Sharpless, esa variación relativa era

$$\Delta\omega/\omega = +(7{,}98 \pm 0{,}73) \times 10^{-12}$$

≪ El primer signo más indica que se trata de una aceleración y no de una desaceleración; el signo ± indica el margen de error que calcula Sharpless en sus mediciones.

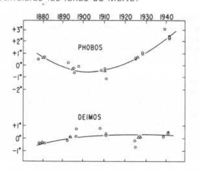


Figura 26-1. Prueba sobre la aceleración secular de Phobos y de Deimos recopilada por B. P. Sharpless. Un satélite sin aceleración secular daría una recta horizontal. Dentro de los errores de observación, los datos de Deimos dan una línea casi horizontal y es sobre esta base que Sharpless deduce una aceleración secular para Phobos. (Cortesía del *Astronomical Journal.*)

≪ Puesto que el período de revolución de Phobos alrededor de Marte es de 7 horas, 39 minutos, o sea, unos 28000 segundos, se mueve, aproximadamente a $28000^{-1} \sim 2{,}1 \times 10^{-5}$ revoluciones por segundo y, por su aceleración, con un incremento de $8 \times 10^{-12} \times 2{,}1 \times 10^{-5}$ de revolución más deprisa cada segundo. Como la distancia de Phobos al centro de Marte es de 9300 km, la aceleración origina un *decremento* del radio de la órbita de $9{,}3 \times 10^{8} \times 1{,}7 \times 10^{-16} = 1{,}6 \times 10^{-7}$ cm cada segundo. En 70 años, el radio de la órbita se ha acortado unos 3 metros, que es una cantidad extremadamente pequeña, pero los cambios consecuentes en el período de Phobos han sido detectables desde la Tierra. A esa velocidad de aproximación, Phobos, que ahora se encuentra a unos 5900 km de la superficie de Marte, chocará contra ésta dentro de $5{,}9 \times 10^{8}$ cm$/1{,}6 \times 10^{-7}$ cm s$^{-1} \sim 3{,}7 \times 10^{15}$ s, o sea, más o menos dentro de cien millones de años. ≫

La mecánica celeste, a una variación continua, no periódica, de uno de los componentes o características de una órbita se le llama "variación secular" (1). ≪ El uso de las palabras "cambio secular" es semejante al que se introdujo en el capítulo 20 al hablar de las variaciones seculares en la configuración de las regiones oscuras de la superficie de Marte. A una variación periódica y, por tanto, de predicción más fácil, se le llama cambio

1.- N. del T. Secular, que abarca un siglo o se repite cada siglo, o "seglar".

"canónico" (2). Las palabras se remontan a la Edad Media, cuando la Iglesia tenía a su cargo el calendario (periódico). Los hechos que no ocurrían conforme al calendario eclesiástico, eran, por rebeldía, seculares ≫ Así pues, Sharpless detectó una aceleración secular en el movimiento de Phobos alrededor de Marte. La prueba aducida de la aceleración secular de Deimos no fue inequívoca.

Como resulta muy difícil observar las lunas de Marte, incluso con los mejores instrumentos, es posible que la recopilación de datos de Sharpless adolezca de errores grandes; no obstante, la gran magnitud de la aceleración secular, $\Delta\omega/\omega$, hace creer que el efecto es real. Supongamos que un observador hipotético en Marte tuviera que predecir la posición de Phobos en el cielo para un período de 50 años, despreciando el efecto de la aceleración secular. Al cabo de ese tiempo, la posición verdadera de Phobos se apartaría 2° de la posición predicha, que es - en mecánica celeste - un desvío muy grande.

Admitamos por un momento que la aceleración secular es un efecto real. Propondremos varias causas concebibles ≪ y luego analizaremos sus consecuencias ≫:

1. Frenado atmosférico. Si Phobos en su movimiento alrededor de Marte atravesara un gas suficientemente denso, éste "frenaría" al satélite haciendo que se contrajera su órbita, resultando de ello una aceleración. Este efecto influye grandemente en el movimiento de los satélites artificiales de la Tierra y es el factor principal para determinar su tiempo de permanencia en órbita.

2. Fricción de la marea, efecto que probablemente desempeñó una función importante en la evolución del sistema Tierra-Luna (3).

3. Frenado electromagnético del movimiento de Phobos por el campo magnético de Marte.

4. Los efectos de la presión de radiación.

5. Perturbaciones clásicas de mecánica celeste.

Consideremos una a una estas posibilidades.

1. *Frenado atmosférico.* En 1954, los astrónomos Frank J. Kerr y Fred L. Whipple, trabajando en los Estados Unidos, concluyeron que un medio resistente, gaseoso, no podía explicar la aceleración secular de Phobos. Calcularon la densidad del medio resistente necesario para producir el efecto observado y, por una serie de supuestos, llegaron a valores de la densidad de dicho medio comprendidos entre 3×10^{-16} y 5×10^{-6} g cm^{-3} ≪ Una estimación más reciente de la densidad necesaria del gas en la vecindad de Phobos efectuada por el científico austroamericano Gerhard Schilling, de la Rand Corporation, la sitúa en $\rho \sim 5 \times 10^{-16}\delta$ g cm^{-3}, siendo δ la densidad general del propio Phobos. En consecuencia, si éste fuera como el material rocoso de

2.- N. del T. De acuerdo con los cánones eclesiásticos.

3.- N. del T. Véase nota al pie de la página 331.

la superficie terrestre, o como el de la Luna, δ sería igual a 3,3 g cm^{-3} y ρ, entonces, como de 2×10^{-15} g cm^{-3}. Si Phobos fuera de hielo, δ sería de 1 g cm^{-3} y ρ de 5×10^{-16} g cm^{-3}. Así pues, la densidad que se requiere para el medio resistente tiene que ser aproximadamente de 10^{-15} g cm^{-3} en el caso, como es en realidad, de que Phobos sea un objeto sólido compuesto por materias ordinarias. ≫

Kerr y Whipple supusieron pues que la fuerza resistente se debía al arrastre del gas y polvo *interplanetario*. El medio interplanetario es aproximadamente igual de denso en las órbitas de Phobos y Deimos. Luego, si la aceleración secular de Phobos está causada por un medio interplanetario resistente, Deimos debería tener también una aceleración secular semejante y, como esto no es el caso, Kerr y Whipple llegaron a la conclusión de que la existencia de un medio amortiguador no podía explicar la aceleración secular de Phobos.

Sin embargo, si suponemos que el medio que se opone es la atmósfera marciana, entonces, a una distancia de unos 23000 km del centro del planeta, en la órbita de Deimos, la densidad atmosférica sería mucho menor que en la vecindad de Phobos. Por tanto, es necesario que estimemos la densidad de la atmósfera marciana a varias altitudes antes de que podamos excluir la explicación del medio resistente.

≪ Antes del feliz término de la misión a Marte del Mariner IV se procuró, con muchas dificultades, calcular la densidad probable de la atmósfera de Marte a las distancias de Phobos y Deimos. Entre las incognitas figuraban la densidad y altura de la base de la exosfera marciana, la temperatura de ésta y su peso molecular medio. Como resultado del experimento de ocultación del Mariner IV (capítulo 20) se conocen hoy con más exactitud algunos de estos parámetros. La base de la exosfera (la región a partir de la cual se puede producir el escape al campo gravitatorio), parece ser que tiene una altura inferior a los 200 km, en comparación con los 1500 km que se habían supuesto anteriormente. La temperatura de la exosfera parece que es unos cuantos cientos kelvin mucho más fría de lo que se suponía y el peso molecular medio a esa altura resulta próximo a 44, que es el del dióxido de carbono. No obstante, a mayores alturas, el constituyente principal sería el oxígeno atómico y, a mayores todavía, el hidrógeno atómico que surge de la fotodisociación del vapor de agua. Con estas cifras, la densidad en la base de la exosfera marciana es, aproximadamente, de 2×10^{9} g cm^{-3}, valor que es 200 veces mayor que el mejor calculado antes teóricamente. Es lógico que a la altitud de Phobos la densidad sea mucho menor.

≪ Sean n_P la densidad de la exosfera marciana a la distancia de Phobos y n_b la densidad en la base de la exosfera. Si las distancias respectivas de Phobos y de la base de la exosfera a la superficie de Marte son Z_P y Z_b, entonces

$$n_P = n_b \exp\{-R^2/H\,[1/(R+z_b) - 1/(R+z_P)]\}$$

siendo R el radio de Marte y $H = kT/mg$ la altura de la escala de la atmósfera, medida de cuán rápidamente declina la densidad atmosférica con la altura. En la expresión de H, k es la constante de Boltzmann, T la temperatura absoluta, m la masa del constituyente atmosférico en cuestión y g la aceleración de la gravedad en la superficie de Marte. La ecuación tiene en cuenta la variación de g con la altura; la dependencia es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia al centro del planeta. Esta ecuación no es exacta, porque consideramos la exosfera, en la cual son raros los choques. No obstante, es válida en una primera aproximación.

≪ Dando valores a la ecuación y considerando que la exosfera marciana estará compuesta en su mayor parte por hidrógeno atómico, hallamos que la densidad a la distancia de Phobos, a unos 6000 km, es del orden de $2 \times 10^5 f_H$, siendo f_H la fracción de abundancia de hidrógeno atómico en la base de la exosfera. Ignoramos el valor de f_H pero, por analogía con la pequeña cantidad de hidrógeno (como un 0,3 %) en la base de la exosfera terrestre, suponemos que es muy pequeño; en particular, la fuente de hidrógeno de la atmósfera marciana tiene que ser la fotodisociación del agua y, como máximo, tendrá 1/1000 del contenido en la atmósfera terrestre. Sería muy sorprendente que f_H fuera superior, por ejemplo, a 10^{-3}. Encontramos entonces que el límite superior de n_P es de unos $2 \times 10^3\ cm^{-3}$. Por comparación, hallamos que la densidad necesaria de la masa de la exosfera para explicar la aceleración secular de Phobos por arrastre atmosférico era de $5 \times 10^{-16}\ \delta\ g\ cm^{-3}$. Para una exosfera de hidrógeno, esto es lo mismo que $3 \times 10^8\ \delta\ cm^{-3}$. Para valores corrientes de δ vemos que la atmósfera está más que 100 000 veces demasiado difusa a la altura de Phobos para que esta explicación sea viable. Los cálculos basados en los valores aplicados antes del Mariner IV daban una discrepancia menor, como de unas 1000 veces.

≪ Así, pues, hemos llegado a la conclusión de que la densidad de la exosfera marciana en la proximidad del satélite Phobos es probablemente 100 000 veces demasiado difusa para dar cuenta de su aceleración secular, si es que Phobos tiene la densidad propia de los materiales sólidos corrientes.

≪ En la exposición que sigue a continuación, analizamos las posibles explicaciones de la aceleración secular de Phobos. La conclusión general es que las explicaciones 2 a 5 no pueden justificarla. El lector que no quiera molestarse con estos datos técnicos, puede reemprender la exposición en la página 418. ≫

2. *Fricción de la marea.* Otra posible explicación de la aceleración secular de Phobos es la fricción de la marea, problema investigado por el geofísico británico Sir Harold Jeffreys, de la Universidad de Cambridge. Puesto que no hay grandes masas líquidas en la superficie de Marte, la fricción de la marea no puede aparecer más que en el cuerpo sólido del planeta. Jeffreys supuso que las propiedades de viscoelasticidad de Marte son las mismas que para el cuerpo sólido de la Tierra. Sus cálculos indican que la fricción de la marea sólo podría explicar el 10^{-4} de la aceleración secular observada de Phobos.

Sin embargo, la cuestión de las propiedades de viscoelasticidad de la materia sólida de un planeta es bastante polémica. Recientemente, el geofísico soviético N. N. Pariiskii ≪ e, independientemente, el geofísico americano G. J. F. MacDonald, de la Universidad

de California, en Los Angeles, ≫ llegan a la conclusión de que las mareas de masa en la Tierra (y, por analogía, en Marte) son significativamente mayores a lo que Jeffreys anticipó. Según los cálculos de Pariiskii, las mareas de masas son del orden necesario para dar cuenta del movimiento secular de nuestra Luna y quizá también de la aceleración secular de Phobos.

Sin embargo, tenemos ahora pruebas, por consideraciones completamente diferentes, de que la aceleración secular de Phobos no puede ser por fricción de la marea. Según Jeffreys, el valor teórico de la aceleración secular de un satélite por fricción de marea viscoelástica en el cuerpo sólido de un planeta puede representarse por la ecuación

$$\frac{d\zeta}{dt} = \frac{9}{4}\frac{m\omega}{M}\left(\frac{R}{r}\right)^5 \psi \operatorname{sen} 2\theta,$$

en la que m es la masa de la luna, M la masa del planeta, R el radio de éste, r el radio de la órbita del satélite en un instante cualquiera, ω la velocidad angular media de la luna y θ el ángulo de retraso de la "ola" de marea. La magnitud ψ depende solamente de las propiedades de viscoelasticidad del planeta. Además, según Jeffreys

$$\operatorname{sen} 2\theta = \frac{\Phi}{2(\Omega - \omega)},$$

donde Ω es la velocidad angular de rotación del planeta y ϕ depende sólo de las propiedades de viscoelasticidad del mismo. Con las ecuaciones anteriores y la tercera ley de Kepler podemos determinar el tiempo que transcurre para que el radio de la órbita circular de la luna pase de r a r_0 a causa de los efectos de la marea:

$$t(r) = t_0(1 - \omega/\Omega)^{-1}\{[(r/r_0)^{13/2} - 1] - (13\omega/10\Omega)[(r/r_0)^5 - 1]\};$$
$$t_0 = 3\omega_0/13(d\omega/dt)_0.$$

En esta fórmula, ω y $(d\omega/dt)_0$ son los valores corrientes de la velocidad angular media de la luna y de su variación con el tiempo, ≪ y $r_0 \sim 2{,}8\ R$ es el valor corriente de r. ≫ Observamos que en el caso de Phobos, $r < 2{,}17\ r_0$ (la distancia desde el centro de Marte para la cual $\omega_0 = \Omega$); de otro modo, esta luna no se acercaría a Marte, sino que recedería. Efectuados los cálculos resulta

$$t(r < 2{,}15\ r_0) < 5 \times 10^8 \text{ años.}$$

Pero 500 millones de años como límite superior del tiempo transcurrido desde la formación de Phobos es un valor inadmisible por su pequeñez. Hace quinientos millones de años las condiciones en Marte (que lleva existiendo desde hace 4 a 5 mil millones de años) no eran significativamente distintas a las contemporáneas. En consecuencia, es inconcebible que en tal época reciente se pueda haber formado una luna que tenga una órbita casi circular y que esté prácticamente en el plano del ecuador del planeta.

Existe otra posibilidad: supongamos que Phobos se formó a una distancia de $2{,}15\ r_0 < r < 2{,}17\ r_0$ y que su período de revolución era casi igual al período de rotación de Marte. Hemos de suponer también que Deimos se formó a la misma distancia crítica; distancia a la cual las fuerzas de las mareas de Marte no hubieran influido de modo apreciable en el movimiento de las lunas. Se podía haber admitido además, que por varias razones las lunas fueron desplazadas de sus órbitas casi estables, que Phobos fue barrido hacia el planeta y Deimos en sentido contrario. Para pequeños desplazamientos, las fuerzas de las mareas serían muy pequeñas y transcurriría mucho tiempo antes de que el radio r de la órbita de Phobos llegara a ser menor que, por ejemplo, $2{,}1\ r_0$. Sin embargo, ésta es una explicación muy poco probable sobre el origen de las lunas. ¿Por qué forzosamente tuvieron que formarse a la distancia precisa a que se cumpla la condición $\omega = \Omega$? Todos los otros satélites que giran alrededor de los planetas del sistema solar, se hallan de éstos a distancias relativamente grandes. Además, es difícil comprender por qué Deimos, sobre el que apenas influyen prácticamente las fuerzas de las mareas (a causa de su poca masa), tendría que alejarse del planeta, fuera de la órbita a la cual $\omega = \Omega$ (donde, de acuerdo con nuestra suposición, tuvo que formarse).

Debe tenerse presente que en el transcurso de varios miles de millones de años puede haber cambiado apreciablemente el período de rotación de Marte, lo cual invalidaría la hipótesis de que los satélites se formaron a una distancia determinada simplemente a partir del valor actual del período de rotación de Marte. De todos modos, estas consideraciones sugieren con fuerza que la aceleración secular observada de Phobos no puede atribuirse a la fricción de la marea en el cuerpo sólido de Marte.

3. *Frenado magnético.* En principio, los efectos electromagnéticos podrían llevar a la aceleración secular observada de Phobos. Imaginemos un satélite que sea buen conductor de la electricidad y que, además, Marte tiene campo magnético. En tal caso, el movimiento de la luna en el campo magnético originaría un campo eléctrico $\mathbf{E}' = [v \times \mathbf{H}]/c$ que polarizaría al satélite, es decir, que las cargas de distinto signo migrarían a lados opuestos. El campo eléctrico de esas cargas en el espacio que rodearía al satélite sería del mismo orden que $\mathbf{E}'$, de modo que el potencial eléctrico respecto a los iones que se encontrara sería $\chi = Es$, siendo s la dimensión característica del satélite. El valor de χ en volts es $300\ E's = 300\ vHs/c$. Suponiendo $v = 2 \times 10^5$ cm s^{-1}, $H = 10^{-3}$ gauss y $s = 10^6$ cm, se halla que x es igual a 2 volts. Puesto que esta energía es comparable con la energía térmica del gas interplanetario, se deduce que los iones positivos se fijarían en la superficie del satélite de carga negativa y que todos los electrones serían repelidos. En el lado opuesto, cargado positivamente, se repelerían los iones y se fijarían algunos electrones. Entonces, la corriente I sería igual al flujo de iones positivos por el hemisferio. Como la velocidad del satélite está próxima a la de los iones, v_1, tenemos $\mathbf{I} = n_1 v_1 e A$ donde $A \propto s^2$ es la sección transversal del satélite, e la carga del electrón y n_1 es la densidad (número) de iones. La fuerza amortiguadora es $f = IHs/c \sim n_1 e v_1 s A H/c$ y la magnitud de la aceleración

$$\left(\frac{dv}{dt}\right) = \frac{n_1 e v_1 s A H}{mc} \simeq \frac{n_1 v_1 e H}{c\delta},$$

donde m es la masa del satélite y δ su densidad. El tiempo de amortiguamiento será

$$t \simeq \frac{v}{dv/dt} \simeq \frac{vc\delta}{n_1 v_1 e H} \simeq \frac{2 \times 10^{15}\,\delta}{n_1}\ \text{años}$$

donde suponemos una distancia de 6000 km a la superficie de Marte, $H = 10^{-3}$ gauss (probablemente por exceso). Como $n_1 < 10^{-5}$ cm y $\delta \sim 2{,}5$ g cm^{-3}, resulta $t > 5 \times 10^{10}$ años. ≪ Así, pues, la escala de tiempo para el amortiguamiento magnético de un satélite conductor sería superior a la edad del sistema solar. ≫

Si la conductividad del planeta es lo bastante pequeña, la corriente que pasa por él se determina entonces por la conductividad eléctrica λ y no por el flujo de partículas cargadas interplanetarias. En este caso

$$I = \lambda E'A \simeq \lambda v H A/c$$
$$f = IHs/c \simeq \lambda^2 H^2 A s/c^2$$
$$t' \simeq \frac{v}{dv/dt} \simeq \frac{c^2\delta}{\lambda H^2}$$

Por debajo de $\lambda \leqslant 10^9 s^{-1}$ (que es bastante superior a la conductividad de las rocas), $t' > t$. Para $\lambda > 10^{10} s^{-1}$, teniendo en cuenta la polarización, el tiempo de frenado electromagnético se determinaría por t.

En resumen, tenemos que concluir que sería imposible explicar la aceleración secular observada de Phobos por fuerzas magnéticas.

4. *Presión de radiación.* Podríamos tratar de explicar esa aceleración secular por efecto Poynting-Robertson. Debido a la aberración de la luz, la fuerza de la presión de la luz sobre un cuerpo en movimiento tendrá una componente dirigida contra el movimiento, que conducirá al frenado continuo del cuerpo. Esto se conoce como efecto Poynting-Robertson. Debido a él, las partículas de polvo de dimensiones superiores a 0,5 μ que giran en órbitas alrededor del Sol, caen en él ≪ en menos tiempo que la edad del sistema solar. ≫ Si una partícula ordinaria tiene una dimensión menor que 0,6 μ (pero mayor que 0,2 μ), la fuerza de la presión de la luz excederá a la de atracción gravitatoria y será expulsada más allá de los límites del sistema solar. (Véase el capítulo 15.)

Sin embargo, estoy convencido de que este efecto, que en este caso depende de la radiación solar directa y de la luz reflejada en Marte, daría una aceleración secular como seis a ocho veces menor que la observada.

5. *Perturbaciones clásicas de mecánica celeste.* Finalmente, debemos considerar la posibilidad de una explicación basada en mecánica celeste pura para esa aceleración secular de Phobos. Por ejemplo, el efecto del Sol en Deimos, en teoría, podría llevar a la aparición de términos de largo período en la longitud planetocéntrica de Phobos. Las perturbaciones del movimiento de los satélites de Marte ocasionadas por el Sol, así como sus mutuas perturbaciones, han sido investigadas recientemente por el astrónomo soviético M. P. Kosachevskii y, de acuerdo con sus cálculos, las perturbaciones mutuas

son más significativas que las solares; además, el movimiento de Deimos resulta bastante más afectado que el de Phobos, hecho que resulta incomprensible puesto que está más lejos de Marte que este último. Según Kosachevskii, las magnitudes absolutas de las perturbaciones de las dos lunas, son muy pequeñas.

En consecuencia, a ninguno de los mecanismos que hemos expuesto se le puede atribuir aparentemente la aceleración secular de Phobos. Desde luego, repetimos, existe cierta posibilidad de que sean erróneas las observaciones de Sharpless, aunque de todos modos, no me parece probable en los momentos actuales.

En 1959 propuso una hipótesis nueva y radical respecto al movimiento de Phobos. ≪ Consideremos de nuevo la exposición de la página 414. Vimos que para que se pudiera explicar la aceleración secular por efecto de un medio resistente, la densidad de éste tenía que ser del orden de 3×10^{8} δ cm^{-3}, siendo δ la densidad de Phobos. Vimos también que las densidades exosféricas marcianas que cabe esperar en las proximidades de Phobos son inferiores a $2 \times 10^{3} cm^{-3}$. ≫ Así, pues, si la densidad media de Phobos fuera de unos ≪ 10^{-5} g cm^{-3}, o con los valores antiguos ≫ 10^{-3} g cm^{-3}, se podría explicar su aceleración secular por la resistencia de la exosfera de Marte.

¿Pero, cómo puede tener un satélite natural una densidad tan baja? El material del que está compuesto debe poseer cierta rigidez, por lo que las fuerzas cohesivas tienen que ser mayores que las fuerzas de mareas gravitatorias de Marte que tienden a romper el satélite. Esa rigidez excluiría de ordinario las densidades por debajo de unos 0,1 g cm^{-3}. En consecuencia, sólo queda una posibilidad. ¿Podría ser Phobos efectivamente rígido *por fuera* y hueco por dentro? Un satélite natural no puede ser un objeto hueco. Llegamos pues a la posibilidad de que Phobos, y quizá Deimos también, sean satélites artificiales de Marte.

≪ Tendrían que ser satélites artificiales a una escala que superaría las aspiraciones más profundas de los ingenieros actuales que proyectan los cohetes. Si la densidad de Phobos está entre 10^{-3} y 10^{-5} g cm^{-3}, su masa tiene que ser entonces del orden de 10 millones a 1000 millones de toneladas, aunque el espesor de su capa sólida externa podría no ser superior a los 30 cm. A modo de comparación, los satélites artificiales más grandes lanzados hasta la fecha desde este planeta son de unas 10 toneladas y no parece posible, al menos en unos cuantos años, que se puedan lanzar satélites artificiales que superen mucho las 100 toneladas. ≫ (Si resulta que el albedo visual de los satélites marcianos es alto, por ejemplo 0,60 a 0,80, sus dimensiones serán 2 ó 3 veces menores que las que indican estos cálculos y, sus masas, 5 a 10 veces menores.)

La idea de que las lunas de Marte sean satélites artificiales, puede parecer fantástica a primera vista. Sin embargo y en mi opinión, merece considerarse seriamente. Una civilización técnica mucho más avanzada que la nuestra podría, efectivamente, construir y lanzar satélites masivos. Como Marte no tiene un satélite natural grande tal como nuestra Luna, la construcción de

satélites artificiales grandes, sería de mayor importancia relativa para una civilización marciana en su expansión por el espacio. El lanzamiento de satélites masivos desde Marte sería una labor algo más fácil que desde la Tierra debido a la menor gravedad marciana. ≪ De modo conceptible, la captura y vaciado de un asteroide pequeño puede ser técnicamente más viable que la construcción en órbita de un satélite artificial con material llevado desde la superficie. ≫

Es muy posible que en unos cuantos siglos la Tierra tanga satélites cuyas dimensiones sean de kilómetros. ≪ Ya se han proyectado laboratorios en órbita, con tripulación, del orden de los 100 metros. ≫ Admitamos que durante los próximos siglos se lanzan y mantienen satélites artificiales masivos terrestres. ≪ En una escala de tiempo mucho mayor - digamos de 10^{7}, 10^{8} ó 10^{9} años - la evolución de la sociedad humana y de la vida en la Tierra no permanecen estáticas. Quizá la humanidad se destruya a sí misma, o se desarrolle una sociedad a la que no le importen los triunfos tecnológicos; quizá evolucione y abandone toda ella la Tierra o que las catástrofes naturales, tectónicas o climatológicas destruyan la civilización. Es lógico que no podamos asegurar ninguna de estas posibilidades, pero lo que sí podemos concebir es que la vida de nuestros satélites artificiales exceda a la de nuestra civilización. ≫ Estos satélites quedarían como monumentos únicos y sorprendentes de una especie extinguida que hubo un tiempo floreció en el planeta Tierra.

A lo mejor, en Marte estamos observando un caso análogo, Según el ilustre cosmoquímico americano Harold C. Urey (4) de la Universidad de California, hace unos cuantos miles de millones de años Marte pudo haber tenido extensos océanos adecuados para el origen de la vida y quizá hasta una atmósfera de oxígeno, ≪ aunque esto último es mucho menos seguro. ≫ Quizá Phobos fue puesto en órbita en el apogeo de una civilización técnica en Marte hace cientos de millones de años.

≪ El escritor soviético F. Zigel ha hecho una sugerencia mucho más fantástica. ¿Por qué - se pregunta - no descubrió Herschel a Phobos y Deimos durante la oposición favorable de Marte de 1862 y en cambio los encontró Hall, con un telescopio más pequeño, durante la oposición favorable de 1877? La única explicación que se le ocurre a Zigel, es que las lunas de Marte fueron lanzadas y puestas en órbita entre 1862 y 1877, de lo que se deduce que hoy día en Marte habita una civilización técnica avanzada.

Pero el telescopio del Observatorio Naval de 1877 era superior a su antecesor en bastantes aspectos y la historia de la astronomía está llena de acontecimientos como éste. Después que Clyde Tombaugh descubriera en 1930 a Plutón desde el Observatorio Lowell, se encontró el planeta en unas placas fotográficas que se habían tomado diez años antes en otros

4.- N. del T. Harold Clayton Urey, químico, premio Nobel de química de 1934, descubridor del deuterio y del agua pesada.

observatorios con mayores telescopios. Urano y Neptuno se habían observado muchas veces antes de su descubrimiento formal, pero su importancia pasó inadvertida. En el capítulo 20 hemos visto la improbabilidad de una civilización existente en Marte. Si sus lunas son artificiales - y en el mejor de los casos sólo tenemos argumentos plausibles en su ayuda - es mucho más probable que sean testamentos mudos de una antigua civilización marciana, que no señales de una sociedad contemporánea floreciente.

≪ Aunque es difícil calcular el nacimiento de Phobos, si, en cambio, podemos tener cierta idea probable de su muerte. Como hemos visto, es posible calcular la fecha en que Phobos penetrará en la baja atmósfera de Marte y chocará contra su superficie, exactamente igual a cómo se puede determinar la destrucción de un satélite artificial de la Tierra. ≫

Los cálculos precisos a partir del valor de la aceleración secular de Phobos dan que hará su impacto en Marte dentro de 10 a 20 millones de años, momento en el cual el planeta llevará existiendo como tal varios miles de millones de años. Esta circunstancia implica otro inconveniente para la hipótesis de que Phobos es de origen natural, pues significa que lo estamos observando en la última fracción de su vida, ≪ coincidencia que, aunque no es imposible, si es muy poco probable. ≫

Cuando en un futuro comparativamente cercano se posen en Marte expediciones sin tripulación y tripuladas, quedará resuelto el fascinante problema de la naturaleza de sus lunas. ≪ Si hace unos cientos de millones de años existió una civilización con avance tal capaz de lanzar satélites de 10 millones de toneladas, sus obras sobre el planeta tuvieron que ser verdaderamente enormes. ¿Están hoy día las arenas de Marte a la deriva sobre los edificios y monumentos de una antigua civilización? Si esa sociedad existiera todavía, parece probable que tuviéramos alguna señal de ella y si ahora está extinguida, las pruebas, peculiaridades y logros de su pasada existencia es probable que las puedan recoger los primeros equipos de exploración marciana.

Desde la superficie de la Tierra se puede hacer antes una prueba parcial de mi hipótesis. La fotometría fotoeléctrica de precisión de Phobos y Deimos obtenida a lo largo de un período de tiempo, puede llevar a determinar la forma de los satélites y a describir sus ejes de rotación. Si se trasluce que los satélites tienen alguna forma especial y particular, daría motivo para pensar en su origen artificial. Sin embargo, ni las observaciones ni sus interpretaciones son muy fáciles de realizar.

Las fotografías de Phobos y Deimos se pueden obtener a corta distancia desde vehículos en vuelo a Marte y mandar a la Tierra los datos telemetrados. No obstante, ésta es una operación delicada que requiere una orientación precisa y el funcionamiento exacto del equipo fotográfico manejado automáticamente. Sobre todo, la cámara, tendría que dirigirse exactamente a Phobos y a Deimos. Pero estos problemas técnicos, sin duda se resolverán en pocos años.

Tan pronto como apareció en un periódico en forma de entrevista la hipótesis del origen artificial de las lunas de Marte, se convirtió en tema de amplios comentarios. La mayoría de los científicos fueron escépticos, reacción que, naturalmente, es del todo comprensible. No obstante, no se dio ningún argumento científico contra ella. Un artículo en la prensa americana, del astrónomo también americano G. M. Clemence, del Observatorio Naval de los EE. UU., decía que el astrónomo británico G. A. Wilkins, que trabajó cierto tiempo en aquel observatorio, había obtenido resultados que indicaban que los datos de Sharpless eran erróneos. En respuesta a mi pregunta, Wilkins dijo que no se habían obtenido nuevos resultados respecto al movimiento de las lunas de Marte. En consecuencia, la afirmación de la prensa americana fue desmentida por el propio Wilkins.

≪ Con posterioridad a la publicación de la edición soviética de este libro, el Dr. Wilkins solicitó amablemente la siguiente inserción en ésta:

"Hasta ahora he recalculado prácticamente todas las observaciones de los satélites de Marte que se hicieron desde su descubrimiento hasta 1941, es decir, para el período cubierto por la nota de Sharpless . . . Los valores hallados para las variaciones seculares de los movimientos medios fueron insignificantes, pero todavía no he confirmado del todo este resultado ni tenido en cuenta las últimas observaciones que me han llegado.

"No hay duda que las observaciones visuales de las posiciones de estos satélites respecto al centro del disco del planeta son difíciles de hacer, pero no tengo pruebas suficientes para poder afirmar que el resultado de Sharpless se basó en observaciones inadecuadas o que el método de cálculo no fue el correcto. Considero que la cuestión de la existencia de las aceleraciones seculares debería considerarse como una probabilidad hasta que se haga un nuevo análisis más completo de las observaciones; no considero que la prueba sea suficientemente fuerte como para justificar cualquier intento de búsqueda de causas artificiales". ≫

Es posible que los resultados de Sharpless sean erróneos, en cuyo caso perdería su base científica la hipótesis de que Phobos y Deimos son de origen artificial. Solamente cuando se efectúen nuevas observaciones más exactas será posible rechazar o confirmar los resultados de Sharpless. ≪ El volver a analizar las observaciones previas, en particular las que van de 1941 hasta la fecha, podría arrojar algo de luz sobre este tema tan atormentador. ≫

Incluso si las futuras observaciones demuestran que la aceleración secular registrada es falsa, la hipótesis de que las lunas de Marte son de origen artificial ha sido, no obstante, provocativa y ha servido por tanto a un propósito útil. Nos hace ver que la actividad de una sociedad de seres inteligentes muy evolucionada podría ser de importancia cósmica y producir artefactos que sobrevivieran a las civilizaciones que los construyeron. Esta conclusión, como veremos en los capítulos siguientes, tiene implicaciones importantes en el problema de la vida racional en el universo.

27

Contacto por radio entre civilizaciones galácticas

Sé perfectamente bien que en este momento el universo entero nos escucha y que el eco de cada palabra que decimos llega a la estrella más remota.

Jean Giraudoux, *La loca de Chaillot.*

En los capítulos anteriores hemos presentado argumentos para mantener nuestra pretensión de que hay unos cuantos miles de millones de sistemas planetarios en nuestra Galaxia y que de ellos, como mil millones de mundos están poblados con sus propias variedades de organismos vivos. En algunos de esos planetas la vida puede llevar existiendo un período de tiempo lo suficientemente grande para que hayan evolucionado formas inteligentes, las cuales, a su vez, hayan producido civilizaciones de tecnología avanzada. La hipótesis de que *forzosamente* tienen que aparecer civilizaciones técnicas, incluso después de muchos miles de millones de años de evolución biológica, implica que el propósito final o meta de la formación de las estrellas y planetas, es la producción de seres racionales y civilizaciones técnicas, lo cual es un punto de vista idealista y teleológico. Debemos tener presente que la Tierra llevaba existiendo miles de millones de años antes de que surgieran en ella formas de vida racional y civilizaciones técnicas.

Por otra parte, como vimos en el capítulo 25, la aparición de vida racional en un universo lleno de sistemas planetarios parece ser un fenómeno probable. En los momentos actuales, puesto que no comprendemos adecuadamente los factores que conducen a la evolución de la inteligencia y a las civilizaciones técnicas, no podemos estimar con certeza la probabilidad de que surjan civilizaciones racionales y técnicas. Por un extremo, esta probabilidad puede estar cerca de uno; por el otro, la Tierra puede ser la única cuna de la inteligencia en la Galaxia. Creemos - no más que una creencia y no un hecho confirmado - que en la Galaxia hay cierto número, quizá incluso muy grande, de planetas que tienen civilizaciones técnicas muy desarrolladas.

≪ No podemos imaginar cúal sería la peculiaridad de esas civilizaciones avanzadas extraterrestres. Pero las leyes de la física son de carácter universal y los mismos descubrimientos que hemos hecho nosotros aquí en la Tierra se habrán hecho en los planetas de otras estrellas, aunque quizá no en la misma secuencia. La capacidad para emitir y recibir ondas de radio se desarrolló en nuestro planeta a remolque del desarrollo de la teoría electromagnética en los últimos veinticinco años del siglo pasado. El físico alemán Heinrich Hertz hizo una importante comprobación de la teoría electromagnética del físico británico James Clerk Maxwell al demostrar que un dipolo oscilante que se carga opuestamente en los dos extremos genera ondas electromagnéticas entre las que se incluyen las de radio. Probablemente, en otros mundos, se han hecho infinidad de veces descubrimientos semejantes en lo que lleva de vida nuestra Galaxia. Es probable, que al igual que nosotros hayan desarrollado la transmisión y recepción de radioondas para las comunicaciones a grandes distancias.

planetarias también interferiría el contacto interestelar por radio. En este caso, la intensidad disminuye cuando aumenta la longitud de onda. En la figura 27-1 vemos como se relacionan con la frecuencia estos dos tipos de interferencia. Es evidente que el valor mínimo de interferencia potencial ocurre en el intervalo de frecuencia entre 10^3 y 10^4 megaciclos por segundo, correspondiente al intervalo de longitudes de onda entre 3 cm y 30 cm.

Supongamos ahora que en cierto planeta, en algún lugar de la Galaxia, habita una civilización técnica muy perfeccionada que quiere dar a conocer su existencia. Los habitantes de ese planeta, al que llamaremos planeta A, deciden enviar una señal de radio en la dirección de un presunto planeta B que está en órbita alrededor de una estrella distante y del que se sospecha que tiene una civilización técnica. Sin embargo, se tropieza con una dificultad inmediata. La estrella alrededor de la cual da vueltas el planeta A es una poderosa radiofuente que emite constantemente. ≪ Los radiorreceptores del planeta B no podrían distinguir entre la señal radiada por el planeta A y la análoga radiada por la estrella a que éste pertenece. ≫ Parece pues, a primera vista, que para transmitir una señal artificial de radio hemos de tener emisoras cuya emisión sea al menos tan potente como la emisión radio de nuestro Sol a las mismas longitudes de onda, si la señal tiene que detectarla una civilización distante. En realidad, las condiciones necesarias de potencia del emisor no son tan rigurosas, como vamos a ver.

≪ A fin de calcular qué potencia ha de tener la emisión planetaria para que pueda ser detectada por encima de la interferencia estelar local, ≫ supongamos que el sol de la civilización que transmite radia a radiofrecuencias iguales a la de nuestro Sol en épocas de poca actividad de sus manchas, cuando está relativamente "tranquilo". Para poder trabajar con valores concretos, consideremos una longitud de onda de 10 cm. A esta longitud, el Sol calmado radia como si fuera un cuerpo negro con una temperatura en la superficie de aproximadamente 50000 K. Aplicando el método de Rayleigh-Jeans a la distribución de la intensidad del cuerpo negro, podemos expresar la intensidad de la emisión radio del Sol por intervalo de frecuencia unidad como

$$W_{\odot} = 4\pi R_{\odot}^2 (2\pi k T_B / \lambda^2),$$

donde la longitud de onda $\lambda = 10$ cm, la constante de Boltzmann $k = 1{,}38 \times 10^{-16}$ erg K^{-1}, el radio del Sol $R_{\odot} = 7 \times 10^{10}$ cm y la temperatura de brillo del Sol en un período de mínimo a longitud de onda de 10 cm es $T = 50000$ K. Aplicando estos valores, hallamos $W_{\odot} = 2{,}6 \times 10^{10}$ erg s^{-1} $Hz^{-1} = 2{,}6 \times 10^3$ watt Hz^{-1}

Hemos de tener presente que el Sol radia a todas las frecuencias y que la potencia total emitida en períodos de mínimo es del orden de decenas de miles de millones de kilowatts; además, la radiación del Sol es isótropa (igual en todas direcciones). Por contraste, las señales artificiales tienen un

ancho de banda muy limitado, quizá tan sólo de unos cuantos miles y hasta pocos cientos de ciclos por segundo. Si se usa una antena lo suficientemente grande, se puede concentrar casi toda la potencia de la señal artificial dentro de los límites de un cono agudo, de conicidad aproximada a λ/D, siendo D el diámetro de la antena parabólica. Este cono se determina por el lóbulo principal de la antena, que se muestra en la figura 27-2, ≪ que es un esquema típico de la directividad de un radiotelescopio. La figura muestra la potencia de salida en varias direcciones. Puesto que la línea recta es perpendicular al disco de la antena, vemos que la generalidad de la potencia emitida o recibida por una antena de radio - cualquiera de las dos - es en la dirección a que apunta el telescopio.

≪ La ganancia de una antena de radio (una medida de su directividad) es la relación entre la potencia transmitida o recibida en la dirección a que apunta, y la menor cantidad de potencia recibida a otras orientaciones a los lados de los lóbulos. ≫

La ganancia de una antena viene dada por $G = 4\pi A/\lambda^2$, donde A es el área efectiva de la antena, cantidad que se aproxima a su área geométrica. Si utilizamos una antena de 100 metros de diámetro (que está perfectamente dentro de la tecnología contemporánea en radio), entonces, a una longitud de onda de 10 cm, la ganancia de antena $G \sim 10^7$. ≪ Con el radiotelescopio semidirigible de 1000 pies, de la Universidad de Cornell en Arecibo, Puerto Rico, aún son posibles ganancias superiores. ≫

Si la potencia total radiada por una antena a longitud de onda de 10 cm fuera igual a la del Sol, la antena radiaría diez millones de veces más potencia que el Sol en la dirección a que se orientara. La potencia del transmisor necesita ser sólo de 10^{-4} watt Hz^{-1} para que la señal en el lóbulo principal sea aproximadamente igual a la del Sol. Esta señal artificial de radio, de banda estrecha, tan direccional, nos permitiría obtener información de un vehículo espacial incluso aunque fuera rumbo al Sol ≪ y tuviera que competir con el ruido de la emisión solar de radio. La investigación directa de al menos las capas exteriores de la atmósfera solar es uno de los objetivos de la exploración espacial actual. ≫

Así, la emisión natural de radio del sol local no tiene que interferir forzosamente la comunicación interestelar emprendida por una civilización técnica avanzada. Una fuente mucho más importante de ruido de interferencia es la radiación radio cósmica de fondo, de la que tendría que discriminar las señales artificiales la civilización que las captara.

En radioastronomía, la capacidad para discriminar se determina por la denominada temperatura de antena T_A; que se define por la fórmula

$$T_A = \left(\frac{\pi^2}{16k}\right) \left(\frac{W}{r^2}\right) \left(\frac{D_1^2 D_2^2}{\lambda^2}\right),$$



Figura 27-2. Diagrama típico de la directividad de una antena de radio, supuesta en el apex de la roseta. El lóbulo grande está orientado prependicular a la antena e indica que, con mucho, la máxima recepción de la antena es en la direccción aproximada a que apunta. Los cuatro lóbulos menores indican que habrá una débil recepción de las señales que incidan por los lados del radiotelescopio. En el lóbulo principal el radiotelescopio es capaz de una resolución angular de λ/D siendo λ la longitud de onda de la frecuencia radio observada y D la abertura de la antena. Si se empleara esta antena para la transmisión de radar en vez de para la recepción pasiva, serviría el mismo diagrama de directividad.

en la que D_1 es el diámetro de la antena receptora, D_2 el de antena emisora, r la distancia entre las civilizaciones y W la potencia por ancho de banda unidad del emisor. Así, para distinguir del fondo la señal artificial, la temperatura de antena debida a la emisión artificial de radio, no tiene que ser inferior a T_B que, en este caso, es la temperatura de brillo del cielo a la misma frecuencia. ≪ En la figura 27-1 vemos que la temperatura de brillo del cielo a 10 cm es de unos 10 K. ≫ En consecuencia, la condición para detectar señales es

$$T_A \geq T_B.$$

Sin embargo, deberíamos observar que en muchos de los casos se puede extraer la señal de ruido incluso cuando T_A es menor que T_B, por ejemplo, cuando $T_A = 0{,}1\ T_B$. Pero, de momento, consideremos sólo el caso en que $T_A \geqslant T_B$.

Haciendo $D_1 = D_2 = 100$ metros, $W = 100$ watts Hz^{-1}, $\lambda = 10$ cm y $T_A = T_B = 10$ K, hallamos que $r \sim 10^{19}$ cm o sea, unos 10 años luz, que es la distancia que corresponde a las estrellas más próximas.

Así pues, las civilizaciones que transmitan y reciban con una tecnología igual a la actual de la Tierra, pueden comunicarse por radio a distancias interestelares. Este hecho tan notable resulta a veces difícil de entender al profano. Las generaciones viejas recuerdan aún cuando se estableció por primera vez contacto trasatlántico por radio. En 1945 se recibió por primera

vez una señal de radar "devuelta" por la Luna. Catorce años después, en 1959, se localizaba a Venus por radar. El contacto por radar con Venus es un problema mucho más difícil que el de la reflexión de las ondas de radar en la Luna, porque la potencia necesaria para que un emisor de radar haga contacto con un blanco, ha de ser proporcional a la cuarta potencia de la distancia a éste. En 1961 se lanzó un cohete cósmico soviético en la dirección de Venus y se mantuvo el contacto por radio hasta cierto punto de su trayectoria.

El 3 de enero de 1963, la nave espacial estadounidense Mariner II envió señales intencionadas a través de 86 millones de kilómetros de espacio interplanetario, con un emisor de 3 watts. Esta potencia escasamente da para encender una bombilla de incandescencia. ¿Cómo es posible que sea adecuada para la comunicación a distancias interplanetarias? La razón es que se transmite un haz dirigido y monocromático, en vez de en todas direcciones como hace la bombilla, y con la antena de la nave orientada directamente hacia la Tierra, y que en vez de radiar en todo el espectro electromagnético, como hace la bombilla, la antena de la nave espacial radia en un intervalo muy pequeño de frecuencia o ancho de banda. Además, en los últimos años se ha ganado mucho en la sensibilidad de los receptores. Al emitir toda la potencia del emisor en un ancho de banda muy pequeño y en un sector muy compacto y mejorar la sensibilidad receptora, se han alcanzado comunicaciones a distancias inmensas con poca potencia. Hoy día son factibles los mensajes de naves espaciales a distancias de varios miles de millones de kilómetros. ≫

Pero las radioemisoras de los vehículos espaciales interplanetarios necesariamente han de pesar poco y, por tanto, ser de poca potencia. Para el contacto por radio a distancias interestelares se dispone de antenas instaladas en el suelo, fijas y muy grandes. ≪ Las figuras 27-3, 27-4 y 27-5 son fotografías de tres de los mayores radiotelescopios en servicio. En la primera, vemos la mayor pantalla del mundo, la del radiotelescopio de la Universidad de Cornell, instalado en Arecibo, Puerto Rico. El diámetro de este paraboloide es de 300 metros. Si repartiéramos los cálculos que acabamos de realizar, admitiendo que tanto la civilización emisora como la receptora pudieran utilizar radiotelescopios como el de Arecibo, sería posible la comunicación estelar por radio a una distancia de 100 años luz. ≫

Además de aumentar el tamaño de las pantallas de radio, en los años recientes se ha perfeccionado la sensibilidad de los aparatos receptores para radiaciones de longitudes de onda del centímetro y del decímetro, es decir, entre 1 y 100 cm. Estos refinamientos se han logrado por la amplia aplicación de los amplificadores de microondas, los denominados masers (1).

1.- N. del T. Abreviatura del inglés *Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation*. Se basa en la producción de fotones por átomos excitados, que constituyen una onda electromagnética que se propaga en la misma dirección que la onda incidente, que vibra en fase con ella y que constituye, por tanto, un refuerzo de la misma.

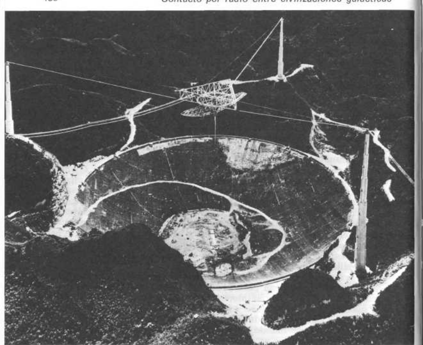


Figura 27-3. Observatorio Ionosférico de Arecibo, el mayor radiotelescopio del mundo en servicio. Tiene una abertura de 300 metros y es semiorientable. Los cables que abrazan a la propia antena están anclados en una profunda depresión tendida que da a un valle ya existente en Arecibo, Puerto Rico.

Estos dispositivos, junto con la mayor precisión en la fabricación de las antenas, nos permiten detectar las señales de una fuente puntual cuando la temperatura de antena es significativamente menor que la de brillo del cielo.

Consideremos el problema con más detalle. Aunque una antena reciba una señal de intensidad constante, la señal de salida del receptor no será del todo constante. Una

Figura 27-4. El radiotelescopio de 85 pies del Observatorio Radioastronómico Nacional de Greenbank, Virginia Occidental, que se utilizó en el proyecto Ozma.

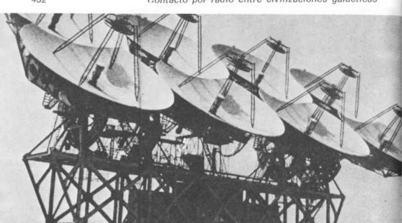


Figura 27-5. Conjunto de 8 discos de 22 metros empleado en la Unión Soviética para las derrotas de los vuelos espaciales soviéticos. Esta disposición es también de mucha utilidad en radioastronomía y un instrumento parecido a él lo puede haber usado la Unión Soviética para sus estudios de la radiofuente CTA 102.

medición diferirá ligeramente de la siguiente. Estas fluctuaciones se pueden reducir a un mínimo, pero nunca eliminar del todo, porque son inherentes al propio receptor. En radioastronomía, es costumbre caracterizar el receptor por T_N temperatura de ruido, ≪ proporcional a la energía del ruido que se origina dentro del receptor. ≫ El valor medio (en realidad la raíz cuadrada de la media de los cuadrados) se puede expresar por

$$\Delta T_N = T_N(\tau\,\Delta f)^{-\frac{1}{2}},$$

donde τ es el tiempo de integración durante el cual el aparato registrador a la salida del receptor acopia información respecto a la potencia de entrada y Δf es el ancho de banda del receptor, es decir, el margen de frecuencias a que puede recibir.

Para detectar una señal débil, la temperatura de antena, que depende de la señal, de ordinario no tiene que ser menor que la fluctuación del ruido ΔT_N. Expresado matemáticamente: $T_A \gg \Delta T = T(\tau\,\Delta f)^{1/2}$. A longitudes de onda de centímetros, la temperatura de brillo del cielo es aproximadamente de 10 K (compruébese en la figura 27-1). Con los masers que hoy día se emplean, la temperatura de ruido del receptor es de 50 a 100 K. Por lo tanto, el nivel acerca del cual tienen lugar las fluctuaciones se determina principalmente por el ruido del receptor y no por el del fondo cósmico.

Estas se pueden escribir así:

$$r \leq (\pi/4)(W/kT_N)^{\frac{1}{2}}(\tau\,\Delta f)^{\frac{1}{4}}(D_1D_2/\lambda),$$

Esta fórmula relaciona el margen de comunicación estelar por radio con la potencia del emisor, las dimensiones de las antenas emisoras y las características del receptor. ≪ Obsérvese que en ella la distancia r de comunicación estelar es proporcional a la raíz cuadrada de W donde ésta no es la potencia total del emisor, sino la del emisor por pasabanda unidad, es decir, por ciclo por segundo. Por tanto, si toda la potencia del emisor se canaliza por una pasabanda de Hz, se puede efectuar el contacto interestelar por radio a una distancia más de cien veces mayor que si se dispersa por una de 10^4 Hz. Luego en alguna otra parte tenemos que pagar el precio de la compresión de la pasabanda, por ejemplo, con un tiempo de integración mayor. ≫ Como valores numéricos, sean $D_1 = D_2 = 100$ metros, $\tau = 100$ segundos y $\Delta f = 10^4$ Hz.

¿Cuál, pues, tiene que ser la potencia de un emisor para establecer contacto a una distancia de 10 parsecs, o sea unos 30 años luz? Esta ecuación indica que la potencia necesaria sería de unos 10 kilowatts ≪ dispersados en 10000 ciclos por segundo, ≫ que es una cifra muy modesta en base a la tecnología contemporánea en radio. ≪ Existen hoy día emisores que a longitud de onda de 10 cm transmiten 500000 watts de potencia con una pasabanda de frecuencia de 1 Hz. Si imaginamos antenas emisoras y receptoras del tamaño de la de Arecibo (300 metros de diámetro), vemos que resultan posibles las comunicaciones interestelares por radio a distancias que se aproximan a los 100 parsecs aplicando una tecnología semejante a la actual terrestre en radio. ¿Cómo podríamos aún mejorar esa cifra? Podemos aumentar la potencia por intervalo de frecuencia unidad de la emisión, disminuir la temperatura de ruido del receptor, aumentar las aperturas de las antenas emisora y receptora o disminuir la longitud de onda de la emisión. Como en la fórmula el tiempo de integración viene afectado de un exponente pequeño, fraccionario, la distancia de comunicación no depende sensitivamente de él. No obstante, estos parámetros no se pueden variar independientemente unos de otros, ya que no son variables independientes. Es probable que las civilizaciones algo más avanzadas que la nuestra puedan, en ausencia de absorción interestelar, comunicarse a distancias mucho mayores que los 100 parsecs; quizá incluso a distancias comparables con las dimensiones de nuestra Galaxia. ≫

Por patrones astronómicos, la potencia que se requiere es insignificante. Por ejemplo, la potencia de radioemisión del Sol en período de mínimo a longitudes de onda entre 10 y 100 cm es, aproximadamente, de 10^9 kilowatts. Y con todo, no se puede detectar a esas longitudes ni la emisión de la estrella más próxima, porque las estrellas radian igualmente en todas direcciones (radiación isótropa) y en un amplio margen de longitudes de onda. Por otra parte, una señal artificial de radio de esa potencia, transmi-

tida desde la estrella más cercana, se captaría con facilidad porque estaría en un sector muy estrecho y sería monocromática.

Hemos indicado antes que las longitudes de onda más eficaces para intentar el contacto interestelar por radio están entre los 3 cm y los 300 m o, ≪ cuando se consideran los efectos del ruido cósmico, entre 3 y 30 cm. Estos intervalos de longitud de onda son bastante amplios. ≫ Parece casi imposible que la civilización hacia la cual se dirijan las señales las capten a menos que de antemano conozcan la frecuencia a que se emiten. ≫ La longitud de onda de 3 cm corresponde a 10^{10} Hz; la de 30 cm a 10^9 Hz (2). Si la pasabanda de la emisión es de 1 Hz, existen nueve mil millones de frecuencias posibles entre 3 y 30 cm. Si multiplicamos el número de éstas por el de posibles planetas habitados, vemos que incluso en una galaxia con densa población de civilizaciones técnicas, el establecer contacto interestelar por radio puede resultar un problema inabordable.

≪ Sin embargo, si cada civilización que se planteara el problema pudiera llegar a idéntica conclusión sobre la frecuencia de emisión preferida, se simplificaría mucho el problema de la comunicación interestelar. ≫ Cocconi y Morrison llegaron a la agradable idea de que la propia naturaleza proporciona una frecuencia reguladora patrón dentro de este margen de longitud de onda, o sea, la raya de radiofrecuencia de 21 cm (1420 megaciclos por segundo) del hidrógeno neutro. (Véase el capítulo 5.) Toda civilización avanzada tiene que haber descubierto esta raya en el espectro de la radiación radio cósmica desde los principios de su desarrollo tecnológico. El hidrógeno es el elemento más abundante del universo y los 1420 MHz tienen que considerarse como la frecuencia fundamental de la naturaleza. Las observaciones radioastronómicas a esta longitud de onda constituyen un instrumento muy útil para la investigación de la Galaxia, como ya vimos en el capítulo 3. También en otros mundos tiene que haber aparatos muy sensitivos sintonizados a esa longitud de onda. Cocconi y Morrison llegan a la conclusión de que es un lenguaje de la naturaleza que han de entender las sociedades técnicas de todo el universo.

≪ Por evidente que nos resulte la elección de esta longitud de onda, queda todavía la cuestión de si lo que es claro en la Tierra puede carecer de sentido para los extraterrestres. Si la tecnología ha avanzado a otro ritmo y los descubrimientos se han hecho en otros mundos según un orden distinto, quizá no sea la banda de los 21 cm la preferida para las comunicaciones interestelares. Aparte de esto, existen otras razones para considerar otras frecuencias posibles. ≫ La radiación de fondo de cielo es apreciable a longitud de onda de 21 cm. Cuando se intenten los contactos a distancias superiores a los 3000 años luz - fuera de nuestras posibilidades actuales, pero al alcance de una civilización más avanzada - la señal resultaría muy absorbida por el hidrógeno interestelar; sobre todo si la señal estuviera confinada a un ángulo muy pequeño dentro del plano galáctico, en el cual, la temperatura de brillo del cielo a longitud de onda de 21 cm puede llegar a los 50 - 100 K. En cambio, a longitudes de onda más cortas (véase la figura 27-1), es inferior a los 10 K. ≪ A esas longitudes de onda más cortas parece que no hay ninguna frecuencia natural como la de la raya del hidrógeno a 21 cm. ≫ Existe siempre la posibilidad de que la frecuencia de la señal pueda ser un múltiplo entero de la frecuencia fundamental del hidrógeno, ≪ como por ejemplo, 2840 megaciclos por segundo (onda de 10,5 cm), ó 4260 megaciclos por segundo (onda de 7 cm).

2.- N. del T. Recuérdese que la longitud de onda expresada en metros multiplicada por la frecuencia es igual a la velocidad de la luz, redondeada a 300000 km s^{-1}.

≪ También hay otras posibilidades. Recientemente se ha descubierto una raya de frecuencia radio interestelar, cerca de los 18 cm, producida por el fragmento molecular OH. Quizá la banda preferida para las comunicaciones sea la de 18 cm, o la de 12 cm, o la de 6 cm. Tiene que haber otras rayas de absorción de radio que todavía no se han descubierto. No obstante, aunque haya como una veintena de esas frecuencias naturales con sus correspondientes armónicos, el pretender la comunicación por esas bandas es muchísimo más sencillo que la búsqueda al azar entre los nueve mil millones de posibilidades de frecuencia. ≫ Podemos inferir que si por el universo hay vida racional dispersa y que si unas civilizaciones están separadas de otras por distancias de decenas o cientos de años luz, la banda más probable de comunicación es la de 1420 megaciclos por segundo. (≪ Tengan presente, sin embargo, que esto es sólo para transmisión local; a largas distancias - por ejemplo, con los cúmulos estelares del centro galáctico - hacen falta otras frecuencias. ≫)

Como ya hemos dicho, la banda de 1420 megaciclos por segundo es ruidosa. ¿Cómo reconocemos una señal artificial? ≪ Primero, hemos de suponer que su característica es de un ancho de banda muy estrecho; ≫ segundo, que la potencia de la señal varía regularmente con el tiempo, es decir, que se trata de una señal modulada. Podría consistir en sucesiones regulares de pulsos relativamente breves separadas unas de otras por intervalos de tiempo determinados. El número de pulsos de cada sucesión podría representar una serie natural de números, como 1, 2, 4, 8, 16, 32, . . . , etc, que seguramente es un concepto conocido por todas las civilizaciones avanzadas técnicamente. La duración de cada pulso no tendría que ser muy breve, pues de lo contrario sería imposible lograr un tiempo de integración τ suficientemente largo para la recepción de las señales. La necesidad de un período de tiempo grande por pulso aumenta con la distancia. ≪ Hemos visto que la distancia de comunicación es función de $\tau^{1/4}$; en consecuencia, se requiere un gran incremento de τ hasta para un incremento mínimo en la distancia de comunicación. En nuestro cálculo de los 100 parses como posible distancia de comunicación para las civilizaciones con nuestro estado de avance científico, hemos supuesto un tiempo de integración de 100 segundos. Si en lugar de esto suponemos 3 horas por pulso, manteniendo constantes las demás magnitudes, la distancia de comunicación aumenta a unos 300

parsecs. ≫ Por tanto, la duración de cada pulso puede ser superior a varias horas. La señal podría contener información compleja, pero al principio tendría que ser muy sencilla. En el capítulo 30 nos dedicaremos con más detalle a la cuestión de la naturaleza de las señales.

Una vez recibida la señal, se puede establecer comunicación en los dos sentidos, seguida de un intercambio de información. ≪ Incluso un intercambio de saludos interestelares podría necesitar decenios o siglos, según la distancia que hubiera por en medio. ≫ Pero la inmensa importancia de ese intercambio de información compensaría ciertamente la natural pesadez de la conversación.

Incluso aunque no tuviéramos éxito para detectar la variación regular de la potencia de las señales con el tiempo, pronto se revelaría el caracter artificial de las señales por las observaciones sistemáticas. La velocidad radial del emisor variaría periódicamente respecto al receptor porque el planeta transmisor, cualquiera que sea, está dando vueltas alrededor de una estrella. A consecuencia del efecto Doppler tendría lugar la variación periódica de la frecuencia de la señal que se transmitiera, ≪ a menos que estuviera compensada adrede por la civilización que la emitiera. ≫ Puesto que la velocidad orbital del planeta tiene que ser de unas cuantas decenas de kilómetros por segundo, la amplitud de las variaciones periódicas de la frecuencia puede llegar a ser de cientos de kilociclos por segundo, ≪ es decir, valores muy superiores a los del ancho de banda de la emisión. ≫ El período de esas variaciones de frecuencia podría ir desde varios meses a varios años, según el período de revolución del planeta transmisor alrededor de su sol local. Así el análisis de la señal no compensada proporcionaría inmediatamente información de la duración del año de esa civilización técnica distante.

Cabe también esperar variaciones periódicas en la frecuencia de la transmisión debidas a la rotación del planeta sobre su eje. Como es de suponer que esta velocidad fuera menor que la de traslación en la órbita, las variaciones de frecuencia originadas por la rotación tendrían probablemente una amplitud que sería menor, pero, no obstante, apreciables observando atentamente; en consecuencia, de la señal deduciríamos la longitud del día en el planeta que transmitiera.

Disponiendo de esta información podríamos deducir muchas otras peculiaridades de los entornos del planeta transmisor. Una vez que reconociéramos la estrella alrededor de la cual está en órbita el planeta, podríamos determinar por su tipo de espectro la masa estelar. La estrella probablemente sería de la serie principal. (Véase el capítulo 6.) Conociendo el período de revolución del planeta, por la tercera ley de Kepler podríamos hallar la distancia entre el planeta y la estrella; conociendo su luminosidad, podríamos hacer un cálculo aproximado de la temperatura promedio en la superficie del planeta. Sabiendo la velocidad de rotación del planeta sobre su eje y la duración de su día, podríamos estimar el radio planetario. Un análisis más detallado nos permitiría incluso determinar a qué latitud del planeta se encontraría el emisor. Así pues, se podría deducir una amplia información

física interesante partiendo de la observación sistemática de las variaciones de la frecuencia de la emisión ≪ de una señal no compensada, aunque, por lo demás, no fuéramos capaces de descifrarla.

≪ Si la variación de frecuencia por el efecto Doppler originado por la rotación y revolución del planeta no está compensada por la civilización emisora, tienen que concurrir ciertas dificultades en la recepción de las señales. Si la pasabanda del receptor es de 1 Hz y, en cambio, la variación de frecuencia por la revolución del planeta es del orden de 10^5 Hz, la posibilidad de que en cualquier instante se reciba la señal emitida es sólo de una entre 100000. Así pues, la civilización receptora que explora el cielo con sus radiotelescopios, puede enfocar al planeta emisor, no recibir señal y pasar a otra estrella antes de que la señal transmitida coincida fortuitamente con la frecuencia de la pasabanda del receptor. Para esta dificultad hay dos soluciones: Primera, que ambas civilizaciones, la transmisora y la receptora hayan pensado lo que acabamos de decir y decidido utilizar solamente pasabandas más anchas, del orden de 100 kilociclos por segundo o un poco menos, que es la amplitud de banda debida a la revolución planetaria. La otra posibilidad es que la civilización transmisora pueda compensar exactamente el efecto de su rotación y revolución y que la civilización receptora pueda igualmente compensar los efectos de sus movimientos propios. Esto tiene la ventaja de que toda la potencia del emisor podría canalizarse por una pasabanda muy pequeña. La banda de comunicaciones sería entonces, por ejemplo, el centro exacto de la raya de emisión del hidrógeno. La frecuencia tendría que conocerse hasta la décima cifra significativa y aún entonces los movimientos propios de las dos estrellas en cuestión desplazarían de la línea central a la frecuencia, por efecto Doppler. La cuestión de si esos movimientos relativos se podrían compensar en un universo en el cual no hay referencia de reposo absoluto, es tema expuesto a conjeturas.

≪ La opinión científica está cambiando ahora. En los primeros tiempos, la suposición de Cocconi y Morrison no habría sido nunca aceptada en una publicación científica, habría sido considerada, con creces, demasiado especulativa. Pero la opinión de los tiempos es distinta. ≫ En 1960, el radioastrónomo americano Frank D. Drake, entonces en el Observatorio Radioastronómico Nacional de Green Bank, en Virgini Occidental, ideó un receptor especial para captar señales de radio interestelares de origen racional a longitud de onda de 21 cm. ≪ Esta empresa se denominó Proyecto Ozma, en honor de la reina del pais de Oz, de una serie de cuentos infantiles de Frank Baum. ≫

La figura 27-6 es la fotografía del receptor de Drake. Tiene un ancho de banda muy estable, es superheterodino, puesto que la señal que se busca tiene que ser de banda estrecha. En el foco de la antena de 27 metros (figura 27-4) hay dos cuernos. La radiación de una pequeña zona cercana a la estrella en investigación, donde cabe esperar se encuentre un planeta emisor, entra en un cuerno y, por el otro, la de una región vecina del ciclo. Cada cuerno alimenta un receptor por medio de un conmutador electrónico. Así,



Figura 27-6. Equipo receptor empleado por Frank Drake en el Observatorio Radioastronómico Nacional para el proyecto Ozma. Por la antena, fuera, puede verse el radiotelescopio de 84 pies. El equipo adicional del que no se dispone para los estudios radioastronómicos corrientes y que Drake precisó en esta investigación, costó unos pocos miles de dólares.

el radiotelescopio atiende alternativamente a la estrella y luego a su región próxima del cielo. Por esta razón, la señal consta de pulsos cortos, interrumpidos periódicamente, a un ritmo igual a la frecuencia de conmutación entre los cuernos. El detector sincrónico a la salida del receptor aisla la componente variable de la corriente derivada de la señal de radio. En radioastronomía se describen como diagramas de modulación esquemas muy semejantes. Nos permiten separar la señal buscada aunque sea mucho más débil que el ruido de fondo del aparato, pero, por desgracia, no se pueden captar por este método las señales extremadamente débiles a causa de las fluctuaciones inherentes a los propios aparatos registradores. Sin embargo, al menos en muchos casos, la modulación nos permite lograr una sensibilidad próxima a la máxima teórica dada por la fórmula que ya encontramos, $\Delta T = T(\tau\, \Delta f)^{1/2}$.

Se hacen cuatro conversiones sucesivas de la frecuencia de la señal, que son necesarias porque el ancho de banda de la señal supuesta es estrecho. En consecuencia, la frecuencia intermedia del receptor tiene que ser baja. Como es costumbre en los receptores superheterodinos, la conversión de frecuencia se lleva a cabo en etapas mezcladoras. Los correspondientes osciladores locales han de tener una estabilidad de frecuencia muy elevada; no debe variar más de 1 Hz en cada 100 segundos de funcionamiento. La elevada

estabilidad es necesaria, sobre todo, en el primer oscilador local ya que su frecuencia es muy alta - 1390 megaciclos por segundo.

Después de estas cuatro etapas de amplificación, la señal se divide en dos partes y pasa por filtros electrónicos, uno de banda ancha y otro de banda estrecha, que están dispuestos de modo tal que sus corrientes de salida son idénticas cuando se recibe una señal de banda ancha. En consecuencia, si las dos corrientes se restan electrónicamente una de otra, se obtiene una salida nula. Sin embargo, si pasa por los filtros una señal de banda estrecha, la corriente de salida del filtro de banda estrecha será superior a la del otro y la corriente resultante, después de la sustracción será distinta de cero. Así pues, el receptor sólo es sensible a las señales de banda estrecha. Los filtros preceden al detector sincrónico y pasan solamente la frecuencia de conmutación, con lo cual sólo se obtendrá señal a la salida del detector sincrónico cuando entre en el receptor una señal de banda estrecha según la dirección que corresponda a la estrella en observación

Drake eligió las estrellas próximas a ε Eridani y τ Ceti como primeros objetos a investigar con su receptor y la antena de 27 metros de Green Bank. En el capítulo 24 encontramos ya estas estrellas al hablar de las cercanas que es probable tengan planetas habitables. Ambas se encuentran, aproximadamente, a 11 años luz. Las observaciones del proyecto Ozma comenzaron en otoño de 1960 y prosiguieron durante varios meses. ≪ Los resultados los dio a conocer el radioastrónomo ruso, el difunto Otto Struve, entonces Director del Observatorio Radioastronómico Nacional de los EE. UU., en los siguientes términos en una conferencia celebrada en el mismo: "Me acuerdo", dijo, "de una historieta en la que aparecía el regreso a la Tierra del primer astronauta que había llegado a Marte. — Díganos - le preguntaron los periodistas —¿Hay vida en Marte? —Bueno - respondió el astronauta - los sábados por la noche hay un poco de vida, pero el resto de la semana es bastante aburrido". —"Pues bien, señoras y caballeros - terminó Struve - hace once años ε Eridani y τ Ceti eran bastante aburridos".

≪ Estas investigaciones pioneras no tuvieron éxito, si bien, en cambio, la inversión en equipo auxiliar fue nada más que de unos miles de dólares. Solamente se investigaron dos de las estrellas próximas y el tiempo total que se dedicó a ellas fue de 200 horas. Indudablemente hubiera sido sorprendente lograr el éxito a la primera tentativa. ≫ Es de lo más probable que las civilizaciones técnicas más cercanas estén a distancias mucho mayores que a 11 años luz, tal como veremos en el capítulo 29. Si las más próximas están a 100 años luz, sería una tarea que llevaría mucho más tiempo el determinar cuál de las decenas de miles de estrellas que están a esa distancia podría albergar una civilización técnica avanzada. La investigación por separado de cada una de esas estrellas sería una labor pesada y cara, ≪ que necesitaría una perpetración a largo plazo para su estudio sistemático. Pero de cualquier manera que se enjuiciara, las consecuencias de un hallazgo positivo compensarían con creces de las fatigas pasadas. ≫ Hasta ahora, en nuestro planeta sólo se han dado los primeros pasos de tanteo hacia el contacto interestelar por radio. Quizá pronto podamos radiodifundir nuestra existencia. No

tendría nada de indecoroso. ¿Qué pasaría si todas las civilizaciones galácticas se dedicaran solamente a recibir y ninguna transmitiera señales interestelares de radio?

⩽ Drake ha sugerido que podríamos "escuchar a escondidas" las radiocomunicaciones planetarias locales de una civilización distante. Las señales de radio que emplea una civilización para sus propios fines tienen cierta distribución de frecuencias característica. Si dirigimos nuestro radiotelescopio hacia esa civilización y exploramos las frecuencias, registramos las que usa característicamente. Quizá ninguna de las señales pueda detectarse por separado, pero si se realiza una segunda exploración a esa misma frecuencia, se pueden comprobar los dos registros por correlación de una con otra. La distribución de frecuencia del ruido cósmico de radio no mostrará ninguna correlación y, en cambio, sí aparecerá en la transmisión artificial. Drake supone que esos métodos de correlación pueden aumentar unas diez veces la distancia a la que podemos detectar la transmisión de radio - con el equipo actual, de 300 años luz a 3000 años luz.

⩽ Y a la recíproca, nuestra civilización se puede detectar a distancias interestelares aun cuando no nos esforcemos en anunciar nuestra existencia. Las comunicaciones por radio a la Tierra a grandes distancias no llevan más de 50 años en servicio. Nos podemos imaginar aquellas primeras emisiones - por ejemplo, una melodía cantada por Enrico Caruso - viajando para siempre a la velocidad de la luz por el espacio interestelar a partir de la posición en que estaba la Tierra hace unos 50 años. Hasta ahora, la señal se ha propagado unos 50 años luz en el espacio. Si a 25 años luz del Sol hubiera una civilización avanzada, podría haber recibido la señal hace veinticinco años, haberla interpretado correctamente e inmediatamente haber dirigido el haz de su respuesta hacia nosotros. Tendríamos que recibir la señal cualquier día de estos. Pero si la civilización técnica más cercana está a muchos cientos de años luz, tendremos que esperar un poco más. Una civilización relativamente cercana con avance semejante al nuestro puede captar algunas de nuestras retransmisiones locales de radio. Hay dos bandas generales de amplio uso comercial que se transmiten por la ionosfera: una es la de toda la televisión; la otra, el extremo de alta frecuencia de la banda emisora de modulación en amplitud, entre los 1000 y 1400 kilociclos por segundo, que a veces se transmite por la ionosfera. Así, los signos característicos de vida en la Tierra que se pueden captar a distancias interestelares cuentan con los contenidos funestos de muchos de los programas de televisión americana y las insensatas efusiones de las emisoras de rock-and-roll. Evidentemente es un pensamiento soberbio que los patanes de Beverly puedan ser nuestros únicos emisarios interestelares.

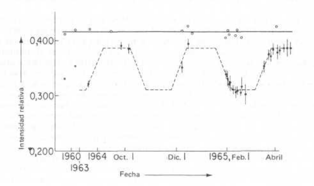
⩽ En nuestra exposición hasta este momento, solamente hemos considerado el contacto interestelar por radio entre civilizaciones a nuestro igual o algo más avanzadas. En cambio, la generalidad de las civilizaciones técnicas del universo puede estar inmensamente más avanzada que la nuestra - quizá hasta en miles de millones de años de adelanto. El astrofísico soviético N. S. Kardashev, colega de I. S. Shklovskii en el Instituto Astronómico de Sternberg, ha considerado la posibilidad de la captación de señales de esas civilizaciones tan avanzadas. Clasifica en tres categorías a las posibles civilizaciones avanzadas tecnológicamente: (I) Nivel de avance científico parecido al contemporáneo de la civilización terrestre. La razón de consumo de energía es de unos 4×10^{19} Hz s^{-1}. (II) Una civilización capaz de utilizar y canalizar toda la producción de radiación de su estrella. La utilización de energía sería entonces comparable con la luminosidad de nuestro Sol; como de 4×10^{33} Hz s^{-1}. En el capítulo 34 consideraremos una propuesta específica para el aprovechamiento de esa potencia. (III) Una civilización con acceso a la potencia comparable con la luminosidad de toda una galaxia; algo así como 4×10^{44} Hz s^{-1}.

⩽ Kardashev examina luego las posibilidades en comunicación cósmica concomitante al aprovechamiento del máximo de potencia disponible. Una civilización del tipo II podría transmitir el contenido de 100000 libros de tamaño medio, por toda la Galaxia, en un tiempo total de transmisión de 100 segundos. Está claro que a las señales les llevaría unas cuantas decenas de miles de años el hacer el viaje. La transmisión de la misma información destinada a un objetivo a 10 millones de años luz, - distancia clásica intergaláctica - necesitaría de un tiempo de unas pocas semanas. Una civilización de tipo III podría transmitir la misma información a una distancia de mil millones de años luz - aproximadamente el radio del universo observable - en 3 segundos. El viaje, está claro que duraría los 10 mil millones de años. Así pues, si esas civilizaciones existen pueden transmitir a distancias inmensas, cantidades enormes y casi increíbles de información. Las señales de una civilización de tipo II entre las galaxias cercanas o una de tipo III del universo observable - que hubiera transmitido apropiadamente en el pasado años ha - aparecería como un faro en la noche con tal de que supiéramos hacia dónde mirar.

⩽ Kardashev ha llamado la atención sobre dos radiofuentes cósmicas con los números CTA 21 y CTA 102 del Instituto Tecnológico de California. Muestran pequeños diámetros angulares y no habían sido identificadas con ninguna fuente conocida de radiación visible en la época que lo comunicó Kardashev. Además, la emisión punta de CTA 102 parece estar aproximadamente en los 30 cm y la CTA 21 por los 37 cm, que no son, en absoluto, las longitudes de onda del ruido cósmico mínimo, ni las que hemos llegado a la conclusión que sean las frecuencias naturales de comunicación más probables. Además, CTA 21 y CTA 102 tienen pasos de banda de miles de megaciclos de ancho, que aparentemente es una futilidad extravagante. Las señales de radio de una civilización de tipo II o tipo III deberían tener un diámetro angular pequeño - visto desde la Tierra - y no guardar probablemente relación con ningún objeto óptico conocido. Suponemos que su longitud de onda esté entre 3 y 30 cm y, probablemente a alguna frecuencia radio universal y natural o armónico de la misma. Sin embargo, las consideraciones sobre la frecuencia se han deducido con miras económicas. Una civilización

tipo II o tipo III se puede permitir, probablemente, el ser extravagante. Hemos de tener presente que un paso de banda de 10^9 Hz se detecta con suma facilidad. Valdría la pena estudiar el posible contenido de la radioemisión de CTA 21 y CTA 102.

≪ Consiguiente a la publicación del artículo de Kardashev, el radioastrónomo soviético G. B. Sholomitskii, del Instituto Astronómico Sternberg, emprendió el estudio de la radiofuente CTA 102 con un potente radiotelescopio - probablemente con el de la línea de antenas de 15 metros de altura de la figura 27-5. Anunció que CTA 102 estaba variando significativamente en intensidad con un período aparente de unos 100 días. En la época de esa advertencia, a principios de 1965, se especuló mucho sobre su significado; en especial, por el interés previo que se había puesto en esta radiofuente. Se decía que la oscilación podría ser para hacer de baliza que avisara la presencia de CTA 102 y que en una escala de tiempo mucho más corta que 100 días podrían descifrarse las palabras concretas de unas comunicaciones por un canal interestelar. También se supuso que las oscilaciones correspondientes a las distintas palabras tenían una escala de tiempo de 100 días, lo que implicaba tardar siglos en recibir un mensaje, aunque fuera el más simple. En la prensa soviética se citó a Kardashev diciendo que había llegado a la conclusión de que CTA 102 era, con toda certeza, una radiofuente artificial, pero el propio Kardashev, al día siguiente, en una conferencia de prensa, criticaba rotundamente esta noticia del periódico. Los intentos para confirmar la advertencia de Sholomitskii han sido equívocos. El radioastrónomo noruego P. Maltby y el americano A. T. Moffet, del Owens Valley Radio Observatory del Instituto Tecnológico de California, no pudieron hallar en



los archivos de las observaciones de CTA 102 de 1961 y 1962 ningún signo de variación sistemática de la intensidad de esta fuente y, más recientemente, otros observadores tampoco han encontrado variación. En la figura 27-7 se muestran las observaciones de Sholomitskii durante un período de muchos meses.

≪ El gran interés en el radioespectro de CTA 102 ha animado a mejores estudios ópticos de esta región del cielo. El astrónomo J. D. Wyndham, del Instituto Tecnológico de California, ha obtenido la fotografía de un tenue objeto que está justo en la posición radio de CTA 102. (Figura 27-8.) De su espectro, Wyndham y Sandage han identificado a CTA 102 como una quasar (capítulo 9) a distancia probable de la Tierra de varios miles de millones de años luz. Se sabe que las quasars varían en intensidad a frecuencias ópticas con períodos comparables a los 100 días. El descubrimiento de Sholomitskii, de confirmarse, hará que sea la primera vez que se observa una quasar que oscila a frecuencias de radio. La gran distancia a que ahora parece probable que está CTA 102 no predispone de por sí a la posibilidad del origen racional de su emisión radio; la podríamos considerar como producto de una civilización de tipo III, aunque el argumento para el origen artificial de la radiofuente CTA 102 está efectivamente muy maltrecho por su identificación como quasar, aunque, en realidad, no sepamos del todo el origen y naturaleza de los quasars. (Véase el capítulo 9.) ≫

≪ Las observaciones más recientes de CTA 102, tienen implicaciones interesantes. Las observaciones de Sholomitskii fueron hechas cerca del máximo del espectro de omisión de CTA 102; en cambio, las investigaciones que se llevaron a cabo en los años recientes en busca de variación a longitudes de onda más largas y más cortas, pero no cerca de los 32,5 cm de la longitud de onda de Sholomitskii, no dieron resultado. A partir del corrimiento hacia el rojo visible, podemos demostrar que la radioemisión máxima

Figura 27-7. Resumen de las observaciones de la radiofuente CTA 102 según mediciones de G. B. Sholomitskii. Los círculos blancos representan la intensidad de la radiofuente CTA 21 con relación a la intensidad de la radifuente 3C 48. Los círculos negros representan la intensidad de CTA 102 con relación a la intensidad presumiblemente invariable de 3C 48. Vemos que a lo largo de los cinco años que aquí se representan, la variación en intensidad de CTA 21 ha sido despreciable y que su emisión se puede representar por la recta horizontal continua. Por otra parte, CTA 102 ha variado significativamente, mucho más que el probable error de una medición cualquiera, como indican los pequeños trazos verticales. La emisión radio de CTA 102 se puede representar aproximadamente por la línea a trazos que sugiere una variación de intensidad con período de unos 100 días y a una longitud de onda próxima a los 325 cm.

de CTA 102 tiene una longitud de onda próxima a los 18 cm *medida en CTA 102*. Esta es una longitud de onda propuesta con anterioridad para la comunicación interestelar; en particular, para distancias intergalácticas cuando resulta ruidosa la "línea" de los 21 cm (confróntese la página 435).

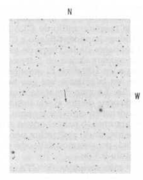


Figura 27-8. Fotografía del campo de la estrella alrededor de la radiofuente CTA 102, que se indica por la flecha. (Cortesía del Dr. J. Wyndham, de los Observatorios de Monte Wilson y Monte Palomar.)

En general, esperamos que las civilizaciones de tipo III han de tener sus señales significativamente desplazadas a longitudes de onda más largas, a causa de la expansión del universo. Si bien ni siquiera es probable, conviene tener presente la posibilidad de que CTA 102 tenga un radioespectro general ideado para llamar la atención a la longitud de onda de la emisión punta, a la cual se está transmitiendo la información. Será interesante ver, cuando se observe ópticamente CTA 21, si está en recesión a una velocidad todavía mayor que la de CTA 102 para estar de acuerdo con su mayor longitud de onda de emisión máxima y si varía cerca de los 37 cm.

≪ Habría que fomentar la búsqueda en bandas más estrechas de civilizaciones tipo I. Excepto por la más pura suerte, la comunicación interestelar por radio no la detectará nuestra recién aparecida civilización técnica sino después de una larga y meticulosa investigación. Pero imaginemos que un día de éstos irrumpe de repente en los receptores de los radiotelescopios el contenido de 100000 libros de una civilización de tipo II, una especie de "Enciclopedia Galáctica para niños". La recompensa del resultado sería inestimable. ≫

Las investigaciones pioneras tales como las de Frank D. Drake son del mayor valor potencial para nuestra civilización. Como oportunamente han indicado Cocconi y Morrison, son muy pocas las probabilidades de éxito en esta empresa, pero ninguna si nada se intenta.

el tiempo en que se fotografía el espectro de la estrella (como una hora) más allá de los límites de frecuencia definidos por el poder de resolución del espectrógrafo. ≪ Pero, igual que en el caso de la comunicación a distancia interestelar a frecuencia de radio, la civilización que transmita puede ser capaz de compensar el movimiento de la fuente. ≫

En resumen, para que una señal laser artificial sea distinguible del fondo de radiación natural, son necesarias las siguientes propiedades: primero, la intensidad emitida tiene que estar confinada a un paso de banda de frecuencia verdaderamente estrecho; segundo, de algún modo tiene que distinguirse de cualquier raya conocida ≪ de emisión estelar ≫ y, por último, si se ha de emplear para transmitir información, como una especie de telégrafo visual, la intensidad en la raya espectral tiene que variar con el tiempo.

Tan pronto como se detecta la presencia en el espectro de una estrella una raya artificial, puede registrarse con detalle por métodos fotoeléctricos que nos permiten aumentar el tiempo de integración de una señal (análogo al de exposición en las observaciones fotográficas) hasta varios minutos. Esto es conveniente para descifrar una señal de luz modulada ≪ lentamente ≫. En todo cuanto hemos dicho sobre la detección de señales ópticas de origen extraterrestre artificial, hemos supuesto que los agudos conos o haces de luz apuntaban precisamente a la Tierra. Puesto que el ancho del supuesto haz de laser — 10^{-7} radianes, o sea 0,02 segundos de arco — es muy poco, la precisión en la dirección de la señal debe mantenerse dentro de los 10^{-7} radianes, lo cual difícilmente se alcanza con la tecnología astronómica terrestre contemporánea.

Si desde un hipotético planeta que dé vueltas alrededor de una de las estrellas más próximas se contempla nuestro sistema solar, el diámetro angular de la órbita de la Tierra es aproximadamente de un segundo de arco. Para el sistema laser que hemos analizado, el ancho del haz emitido por la civilización extraterrestre será de unos 10 millones de kilómetros cuando llegue al sistema solar, distancia equivalente a 1/15 de la que hay entre el Sol y la Tierra. Puesto que la civilización extraterrestre probablemente no sabe de antemano dónde está localizado nuestro planeta, el haz de laser tendrá que barrer los límites supuestos de nuestro sistema solar a fin de hallar la Tierra. Por esta razón, la Tierra sólo estará expuesta ocasionalmente al haz de laser, con lo cual disminuirá la posibilidad de detectarlo. Creo que esta es una cuestión muy importante que no tuvieron en cuenta Townes y Schwartz y que podría reducir considerablemente el valor del laser para las comunicaciones interestelares. ≪ No obstante, el profesor Townes ha dicho luego que la civilización que emitiera el haz podría saber determinar la posición de los planetas habitables en el sistema solar a que apuntara. ≫

La dificultad también se podría eludir suponiendo que el ancho del haz es varias veces mayor que la distancia entre la Tierra y el Sol. Para el sistema laser que hemos expuesto antes y para estrellas a diez años luz, se tendría que incrementar la potencia del laser varios miles de veces. Este requisito de aumento de potencia, no constituye, no obstante, una razón de peso contra el posible empleo del laser en las comunicaciones interestelares. En realidad, estamos convencidos que los lasers, con los últimos retoques óptimos, serán del todo apropiados para el contacto interestelar, ≪ por lo menos para las distancias de que hemos hablado. ≫ Como ya citamos antes, hay buena razón para creer que las cotas en la potencia del laser se incrementarán mucho en las próximas décadas, pues para que bajo un punto de vista bélico tenga importancia, se ha de aumentar su potencia a millones de kilowatts.

≪ Con una potencia de millones de kilowatts, un haz de laser que ocupe todo el interior del sistema solar de la estrella elegida como blanco, sería útil para el contacto interestelar a distancias de cientos de años luz. Si los dispositivos colectores de luz de la civilización receptora tienen superficies de más de 500 cm de diámetro, aún son posibles las comunicaciones a distancias mucho mayores. Obsérvese que la superficie colectora no precisa tener las exquisitas propiedades ópticas de los espejos de los telescopios reflectores. No estamos interesados en formar una imagen puntual de la estrella emisora, sino, simplemente, en obtener un espectro de elevada resolución del haz de laser que transmite. Para este objeto podríamos emplear un "cubo de luz" grande, quizá con facetas, compuesto no forzosamente de cristal, sino más bien de metales o materias plásticas y de construcción mucho más sencilla que la de un telescopio reflector de dimensiones comparables. Cuando estas sustanciales perfecciones se convierten en realidad, es posible que el factor limitante del alcance de la comunicación interestelar a frecuencias ópticas sea la absorción por el medio interestelar; limitación sobre todo importante para cualquier intento de comunicación con civilizaciones en la dirección del centro galáctico. ≫

En el estado tecnológico terrestre actual, las longitudes de radioondas de, por ejemplo, 21 cm, constituyen un medio más económico de comunicación interestelar, que las longitudes de onda ópticas. No obstante, nuestros criterios económicos pueden ser distintos a los de otras civilizaciones planetarias. ≪ Townes y Schwartz señalan que en la evolución de la tecnología terrestre, el laser podría haber antecedido al desarrollo de los radiotelescopios. ≫ Estamos basando la técnica y posibilidades económicas de la comunicación interestelar en las condiciones contemporáneas y, éstas, pueden variar.

≪ Dentro de la exposición del contacto interestelar a frecuencia óptica, tenemos que mencionar las sugerencias de Drake y Shklovskii de que, si bien no se puede efectuar la comunicación de gran cantidad de información, al menos se puede dar a conocer la presencia de una civilización mediante *marcadores*. Prevén la radiación de un isótopo de poca vida — uno que de ordinario no se espere en el espectro estelar local — en la atmósfera de la estrella. En cualquier caso, el material del marcador tendría que ser de un tipo difícil de explicar, excepto como resultado de una actividad intelectual. Drake considera un átomo con una fuerte raya de absorción resonante, que se pueda esparcir a unos 10^8 fotones por segundo en el campo de radiación estelar. Un

29

Distribución de civilizaciones técnicas en la galaxia

Lejanas y escasas, lejanas y dispersas
son las tierras donde habitan los jumblies:
sus cabezas son verdes y sus manos azules;
y fueron a la mar en una semilla.
Edward Lear, *The Jumblies*

≪ En los dos últimos capítulos hemos visto que parecen pausibles las perspectivas de comunicación interestelar a distancias de algunas decenas de años luz; que son más difíciles a cientos de años luz y que a miles de años luz sólo son posibles para civilizaciones bastante más avanzadas que la nuestra. Si pareciera probable la existencia de civilizaciones técnicas en planetas sólo a 10 ó 20 años luz, o civilizaciones muy por delante de la nuestra a distancias mayores, valdría la pena esforzarse en establecer contacto. Por otra parte, si sólo podemos suponer civilizaciones más o menos a nuestro avance científico a miles de años luz, no serían de utilidad los intentos de comunicación, al menos por ahora. En este capítulo nos esforzaremos en calcular el número de civilizaciones técnicas existentes en la Galaxia, lo cual nos permitirá estimar las distancias medias entre civilizaciones. Para llevar a cabo esas cuentas, hemos de dar valores numéricos a cantidades que apenas conocemos, tales como los años de vida promedio de una civilización técnica. La fiabilidad de nuestras respuestas reflejará esa incertidumbre. ≫ El análisis tendrá exclusivamente carácter probabilístico, ≪ y se invita al lector a que haga sus propias estimaciones de los valores numéricos implicados y a que deduzca sus propias conclusiones sobre el número de civilizaciones técnicas en la Galaxia. ≫ Sin embargo, no cabe duda del interés metodológico de estos análisis e ilustran muy bien la potenciabilidad y limitaciones de este tipo de investigación.

≪ Nos interesaremos por dos métodos generales: el primero, de exposición sencilla, debido principalmente a Frank Drake y, el segundo, que es un planteamiento más completo hecho por el astrónomo alemán Sebastian von Hoerner, cuando trabajaba en el Observatorio Radioastronómico Nacional, en Green Bank, Virginia Occidental.

≪ Queremos calcular el número de comunidades galácticas existentes que han alcanzado una capacidad técnica apreciablemente superior a la nuestra. Al ritmo actual de progreso tecnológico, podemos imaginar esa capacidad como de cientos de años o más que nuestro estado actual de desarrollo. Un método sencillo de calcular este número, N, fue el que se expuso en una conferencia sobre vida racional extraterrestre, celebrada en noviembre de 1961, en el Observatorio Radioastronómico Nacional, presentada por la junta de la ciencia espacial de la Academia de Ciencias. Concurrieron a la conferencia D. W. Atchley, Melvin Galvin, Giuseppe Cocconi, Frank Drake, Su-Shu Huang, John C. Lilley, Philip M. Morrison, Bernard M. Oliver, J. P. T. Pearman, Carl Sagan y Otto Struve. Aunque los detalles difieren en algunos aspectos, lo que sigue a continuación está en total acuerdo con las conclusiones de la conferencia.

se desarrollan las civilizaciones técnicas — que si genéticamente es factible, parece probable que sea la selección natural la que los produzca.

≪ El fisiólogo americano John C. Lilley, del Instituto de Comunicación Experimental, de Coral Gables, Florida, opina que los delfines y otros cetáceos tienen unos índices de inteligencia sorprendentemente altos. Sus cerebros son casi tan grandes como los de los seres humanos; están convolucionados, como los nuestros y su anatomía neural es notablemente parecida a la de los primates, a pesar de que el antecesor común más reciente de los dos grupos vivió hace más de cien millones de años. Los delfines pueden emitir numerosos sonidos de gran complejidad, que casi con toda seguridad utilizan para comunicarse con otros delfines. Las pruebas más recientes indican que son capaces de contar y de imitar las voces humanas. Desde la época de Plinio hasta la fecha se han registrado numerosas anécdotas que se cree ponen de manifiesto la gran inteligencia de los delfines. El estudio pormenorizado del comportamiento del delfín y las pruebas formales para comunicarse con ellos, acaban de empezar y ofrecen la posibilidad de que algún día nos podamos comunicar, al menos a nivel elemental, con otra especie inteligente en nuestro planeta. La capacidad manipulativa de los delfines es muy limitada y a pesar de su grado aparente de inteligencia, no han podido desarrollar una civilización técnica. Pero su inteligencia y comunicatividad sugieren fuertemente que estas cualidades no se limitan a la especie humana. Con el supuesto de que la Tierra no es la única morada de criaturas con inteligencia y capacidad manipulativa y admitiendo además el hecho de que aparentemente sólo se ha desarrollado una de tales especies en toda su historia y que esta es sólo reciente, adoptamos $f_i \sim 10^{-1}$.

≪ La civilización técnica presente del planeta Tierra se puede seguir de Mesopotamia al sudeste de Europa, Europa Occidental y Europa central y luego a la Europa oriental y Norteamérica. Supongamos que en algún lugar de la tortuosa senda de la historia de la cultura no hubiera tenido lugar un suceso. Supongamos que Carlos Martel no hubiera evitado la invasión musulmana con su victoria contra los árabes en la batalla de Poitiers, en octubre del año 732 d. J.C., cuando las tropas de Abd al Rahman se dirigían hacia Tours. Supongamos que el emperador mongol Ogoday no hubiera fallecido en Karakoram cuando las tropas de su general Subutāy entraban en Hungría y Austria, en 1241, y que la invasión mongólica hubiera ocupado las regiones no forestales de la Europa Occidental. Supongamos que los manuscritos de los clásicos de Grecia y Roma antiguas no se hubieran preservado en la Edad Media en las mezquitas africanas y en los monasterios irlandeses. Podríamos hacer miles "supuestos". ¿Hubiera desarrollado el pueblo chino una civilización técnica de haber estado totalmente aislado de Occidente? ¿Habría la civilización azteca desarrollado un período técnico de no haber habido conquistadores? La historia conocida incluso a modo mitológico, tan sólo abarca una fracción que no llega a 10^{-2} del período que la Tierra lleva habitada por homínidos e inferior a 10^{-5} de su tiempo geológico. Las mismas consideraciones intervienen aquí para la determinación de f_i. El desarrollo de una civi-

lización técnica tiene un gran valor de supervivencia, al menos hasta cierto punto, pero en cualquier caso concreto, depende de la concatenación de muchos acontecimientos improbables y sólo ha tenido lugar recientemente en la historia terrestre. No es de creer que la Tierra sea extraordinaria por tener una civilización técnica entre los planetas ya habitados por seres racionales. Como antes en la escala de tiempos evolutivos estelares, adoptamos $f_c \sim 10^{-1}$.

La multiplicación de los factores procedentes da $N = 10 \times 1 \times 1 \times 1 \times 10^{-1} \times 10^{-1} \times L = 10^{-1} \times L$, siendo L la vida media en años de una civilización técnica que tenga interés y capacidad para la comunicación interestelar. Para el cálculo de L, por fortuna para nosotros, pero por desgracia para la explicación, no existe ni siquiera un ejemplo terrestre que se conozca. La civilización técnica actual de la Tierra ha alcanzado la fase comunicativa (en el sentido de antenas direccionales de elevada ganancia para la recepción de radioseñales extraterrestres) hace sólo unos pocos años. Existe la magnífica posibilidad de que L para la Tierra se pueda medir en décadas. Por otra parte, es posible que las diferencias políticas internacionales terminen de una vez y que L se pueda medir en tiempo geológico. Es concebible que en otros mundos, la resolución de conflictos nacionales y la instauración de gobiernos planetarios se haya logrado antes que las armas de destrucción masiva. Podemos imaginar dos soluciones extremas para el cálculo de L: (a) una civilización técnica que se destruye a sí misma poco antes de llegar a la fase comunicativa (L menor que 10^2 años) y (b) una civilización técnica que aprende a vivir consigo misma poco después de alcanzar la fase comunicativa. Si sobrevive más de 10^2 años es poco probable que luego se destruya a sí misma. En este caso su vida se puede medir en una escala de tiempo de evolución estelar (L mucho mayor que 10^8 años). Esa sociedad ejercerá la autoselección en sus miembros. Se podrían controlar los lentos y a su vez inexorables cambios genéticos que de muchas maneras hacen que los individuos no sean apropiados a una civilización técnica. La tecnología de una sociedad así, evidentemente sería adecuada para hacer frente a los cambios geológicos, aunque su origen es sensitivamente dependiente de la geología. Ni siquiera la evolución del sol local por sus fases evolutivas de gigante roja y enana blanca supondría problemas insuperables para la supervivencia de una comunidad extremadamente avanzada.

≪ Parece poco probable que una civilización planetaria avanzada, rodeada por muchas y florecientes comunidades galácticas distintas, se retraiga de la fase comunicativa. Esta es una razón de que L depende en sí de N. Otra razón es la propuesta por Von Hoerner: supone que los medios de evitar la autodestrucción deben estar entre las satisfacciones primarias de la comunicación interestelar inicial. Si N es grande, los valores de f_l, f_i y f_c como resultado, tienen que ser grandes también. En el capítulo 15 mencionamos la posibilidad de la introducción consciente de vida por viajes espaciales interestelares en planetas que de otro modo serían estériles. A continuación, en el capítulo 33,

veremos la posibilidad de que esos viajantes del espacio puedan afectar también al valor de f_c.

≪ Nuestras dos elecciones de $L > 10^2$ años y $L >> 10^8$ años, nos dan dos valores de N: menos de diez civilizaciones comunicativas galácticas y más de 10^7. En el primer caso, podríamos ser la única civilización existente; en el segundo, la Galaxia está llena de ellas. El valor de N depende de modo muy crítico de nuestra expectación del tiempo de vida de una comunidad avanzada media. Me parece lógico que al menos un pequeño porcentaje de las civilizaciones técnicas avanzadas de la Galaxia no se destruyan a sí mismas ni pierdan el interés en la comunicación interestelar ni sufran catástrofes biológicas o geológicas insuperables y que los tiempos de sus vidas puedan, por tanto, medirse en escalas de tiempo de evolución estelar. Como promedio de todas las civilizaciones técnicas, tanto de poca, como de mucha duración, yo adopto $L \sim 10^7$ años, con lo cual resulta un número promedio de civilizaciones técnicas avanzadas en la Galaxia $N \sim 10^6$.

En consecuencia, aproximadamente el 0,001 por ciento de las estrellas del cielo tendrán consigo un planeta en el que resida una civilización avanzada. La distancia más probable a la comunidad más próxima, así definida, es entonces de varios cientos de años luz. En la conferencia sobre vida extraterrestre racional del Consejo de Ciencia Espacial antes mencionado, los distintos valores seleccionados de N están entre 10^4 y 10^9 civilizaciones. El intervalo correspondiente de distancias a la comunidad avanzada más cercana está pues entre diez y varios miles de años luz.) ≫

Consideramos ahora la exposición de Von Hoerner de la distancia probable entre civilizaciones galácticas. Define a ν_0 como el número de estrellas respecto a las cuales puede haber planetas habitados; a T_0 como el tiempo que transcurre entre la formación de un sistema planetario determinado y la aparición de una sociedad avanzada técnicamente y a L como el tiempo de vida de una sociedad así. Además, sea T la edad de las estrellas más antiguas y sea ν el número de estrellas en las que en realidad existe hoy día una civilización avanzada técnicamente.

Supone entonces Von Hoerner que la velocidad de formación estelar es constante en todo el período T, ≪ suposición que, como hemos visto, probablemente no es del todo válida. ≫ Deduce así que

$$\nu = \nu_0(T - T_0)/T$$

si $L \geqslant T - T_0$ y

$$\nu = \nu_0 L/T$$

si $L \leqslant T - T_0$. Sea d_0 la distancia entre estrellas vecinas. En tal caso, la distancia media entre civilizaciones técnicas vecinas será

$$d = d_0 \nu^{-\frac{1}{3}}.$$

Considera Von Hoerner las cinco posibilidades siguientes sobre la limitación de la vida de una civilización técnica: (1) La obliteración total de toda la vida en el planeta; (2) la destrucción de sólo las formas de vida superiores; (3) la degeneración y decadencia física o intelectual; (4) la pérdida de interés en la ciencia y la tecnología y (5), ninguna limitación en absoluto a L. Cree Von Hoerner que la condición (5) es del todo inconcebible, ≪ aunque a nosotros no nos parezca así ≫. También cree que en los casos (2) y (3) podría surgir una nueva civilización en el mismo planeta, de las cenizas de la antigua o a partir de otras formas de vida menores no afectadas. El tiempo necesario para el restablecimiento de esa civilización sería probablemente corto comparado con T_0. ≪ Fred Hoyle ha sugerido que el restablecimiento de la civilización quizá no sea tan fácil como parece. Nuestra civilización se desarrolló empleando combustibles fósiles como fuente energética. El carbón y el petróleo de la corteza terrestre son los residuos de cientos de millones de años de evolución biológica y destrucción. Al ritmo actual de crecimiento, dentro de 50 ó 100 años habremos agotado todos los combustibles fósiles de la Tierra. Si nuestra civilización tuviera entonces que destruirse a sí misma, la falta de combustibles fósiles haría muy poco probable el desarrollo de otra sucesora, al menos durante unos cuantos cientos de millones de años. ≫

Designaremos la vida media de estas cinco hipótesis por L_1, L_2, L_3, L_4 y L_5 y la probabilidad de realización de cada una, respectivamente, por P_1, P_2, P_3, P_4 y P_5. Así pues,

$$\nu = (\nu_0/T)P_1L_1 + P_2L_2 + P_3L_3 + P_4L_4 + P_5(T - T_0)Q,$$

donde Q, igual a $[1 - (P_2 + P_3)] - 1$ tiene en cuenta la posibilidad de restauración de una civilización destruida. Puesto que $L = P_1L_1 + P_2L_2 + P_3L_3 + P_4L_4 + P_5(T - T_0)$ es la vida media de una civilización técnica, se puede simplificar esta ecuación a

$$\nu = QL\nu_0/T.$$

¿Cuál es la edad probable de la primera civilización extraterrestre con la que podríamos establecer contacto? Un análisis sencillo de Von Hoerner indica que ese tiempo es

$$\tau = [P_1L_1^2 + P_2L_2^2 + P_3L_3^2 + P_4L_4^2 + P_5L_5^2]/2L,$$

y la probabilidad de que en un planeta determinado hubo al menos una civilización previa es

$$P_2 = (Q - 1)/Q.$$

Para obtener unos valores numéricos concretos de estas fórmulas generales, hay que asignar valores a las diversas P_i y L_i. Los valores que asigna Von Hoerner a estas magnitudes, ≪ como a cualquiera de las otras, ≫ son totalmente subjetivos. Pero obsérvese que si combinamos nuestras ecuaciones de d y ν hallamos

$$d = d_0(\nu_0 QL/T)^{-\frac{1}{3}}$$

excepto para civilizaciones de muchos años. Así pues, nuestra incógnita principal, L, aparece con el exponente $-1/3$ y la incertidumbre de nuestro L estimado no afectará grandemente a nuestro valor estimado de d.

La tabla VI da las estimaciones de Von Hoerner del tiempo de vida probable de una civilización avanzada según cada una de sus cinco hipótesis. Da asimismo sus estimaciones de la probabilidad de realización de cada uno de estos modos para la terminación de una civilización.

TABLA VI

CONJUNTO ARBITRARIO DE VALORES PARA LOS TIEMPOS DE VIDA Y PROBABILIDADES DE DESTRUCCIÓN DE LAS CIVILIZACIONES TÉCNICAS
(según Von Hoerner)

Alternativa	*Duración estimada de L_i, en años*	*Valor adoptado*		*P_iL_i años*
		L_i, años	*P_i*	
Destrucción completa	0–200	100	0,05	5
Destrucción de la vida superior	0–50	30	0,60	18
Degeneración	10^4–10^5	3×10^4	0,15	4500
Pérdida de interés	10^3–10^6	10^4	0,20	2000
Sin limitación	—	—	0,00	0

En mi opinión, es lógico suponer que la era de desarrollo técnico en cualquier planeta es finita; sin embargo, todo intento de estimación de las probabilidades respecto a esta idea son subjetivos y pueden llevar a resultados paradójicos, que es una cuestión que más adelante analizaremos. Para los valores de la tabla VI seleccionados por Von Hoerner para L_1 y P_1 resulta la vida media L de una civilización técnica, igual a 6500 años y el número medio de civilizaciones destruidas y vueltas a establecer, Q, igual a 4. ≪ Obsérvese, no obstante, que Von Hoerner asigna la probabilidad nula a una civilización de mucha duración, como la que describimos al principio del capítulo. Hasta la mínima probabilidad de ocurrencia de una civilización así, llevaría por el desarrollo teórico de Von Hoerner a un valor muy grande de la vida media de una civilización técnica. Por ejemplo, si $L_5 = 10^9$ años y $P_5 = 10^{-2}$, resulta $L = 10^7$ años. ≫ Pero con los valores de Von Hoerner y $T = 10^{10}$, $\nu = 0{,}06$ y $d_0 = 2{,}3$ parsecs — distancia media entre el Sol y las estrellas más próximas — hallamos que $\nu = 2{,}6 \times 10^{-7}$. Esto quiere decir que dentro del marco de las hipótesis de Von Hoerner, solamente una de cada tres millones de estrellas tiene un planeta en el que actualmente hay vida racional. La distancia media entre las civilizaciones galácticas es, pues, $d = 360$ parsecs o un poco más de 1000 años luz. ≪ Considerando las diferencias en los enfoques analíticos y las selecciones de los valores numéricos de nuestra primera exposición y la actual de Von Hoerner, la coincidencia de los resultados finales es un tanto complaciente. ≫ La edad más probable de una civilización técnica cuando hagamos contacto con ella por primera vez es $\tau = 12000$ años. ≪ El nivel de desarrollo técnico de una civilización así nos es difícil de imaginar, pero si corresponde a la civilización técnica de la Tierra en el año 14000 de nuestra era, desarrollada continuamente desde ahora, tiene que ser distinta; no en grado, sino en clase, a la nuestra. ≫ Hay un 75 por ciento de probabilidad de que esa civilización sea la sucesora de otra más antigua que previamente hubiera florecido en el mismo planeta, pero que luego fue destruida. Los cálculos indican que sólo hay una probabilidad muy pequeña — como de un 0,5 por ciento — de que cualquier contacto interestelar fuera con una civilización en la misma fase de desarrollo que la nuestra. ≪ En consecuencia, en cualquier contacto interestelar, lo más probable es que tengamos mucho más que aprender que enseñar. ≫ Volvemos a insistir en que todos los valores numéricos precedentes sólo son válidos en la medida en que lo sean los iniciales de L_i y P_i y estos, forzosamente son arbitrarios.

Sin embargo, si estas suposiciones son del todo correctas, podemos concluir que sería útil intentar detectar señales radio por los métodos del proyecto Ozma. (Véase el capítulo 27.) Si la civilización técnica más cercana estuviera a 1000 años luz ¿cómo podrían sus habitantes distinguir nuestro Sol entre los millones de estrellas que están dentro de los 1000 años luz de ellos y dirigir hacia nosotros la información o preguntas? Es más razonable suponer que se emitieran las señales en todas direcciones y que se destinaran en principio a dar a conocer la existencia de su civilización técnica, una señal de

30

Contacto interestelar por radio: carácter de las señales

Y si aceptamos para esos habitantes planetarios alguna especie de razón, algunos se preguntarán si tiene que ser igual a la nuestra. En verdad que ha de ser así, tanto si la consideramos en base a la Justicia y la Moral como en base a los principios y fundamentos de la Ciencia. Pues la razón para con nosotros es lo que nos da el sentido verdadero de la justicia y la honestidad, el elogio, la amabilidad y la gratitud, es decir, la que nos enseña a distinguir universalmente entre lo bueno y lo malo, y nos capacita para el saber y la experiencia. ¿Y puede haber en algún lugar otra clase de razón distinta a ésta? ¿O, quizá lo que consideramos justo y noble, se conceptúe en Júpiter o Marte de villanía injusta?

Chritiaan Huygens, *Nuevas Conjeturas respecto a los mundos planetarios, sus habitantes y producciones* (1670)

Consideremos ahora a priori las características de las señales de radio ≪u ópticas de laser≫ que podrían recibirse de otros planetas. Según Von Hoerner, la naturaleza de las señales vendría determinada, en su esencia, por (a) el fin a que se destinan y (b) la banda de transmisión más económica. Se pueden prever tres tipos generales de señales: (1) radiodifusión local, es decir, la radiación de las comunicaciones locales de un planeta, tales las de sus emisoras de televisión. ≪ Estando a la escucha, quizá se puedan captar esas señales en condiciones determinadas; ≫ (2) señales a grandes distancias, es decir, contacto por radio dirigido específicamente entre dos civilizaciones y (3), señales de advertencia, es decir, que se transmiten con el propósito de llamar la atención de cualquier civilización con la cual no se haya establecido contacto todavía.

En el capítulo 27 se habló de las emisoras de radiodifusión locales. Hemos visto que gracias a la actividad del género humano, la potencia del espectro radio de la Tierra, a longitudes de onda de metro, es aproximadamente de 1 watt Hz^{-1} y que la temperatura de brillo de la Tierra a esas longitudes de onda, es de unos 100 millones de grados. Si un observador hipotético estuviera a la distancia de las estrellas más próximas como a unos 10 años luz, el flujo de radiación de la Tierra sería de unos 10^{-35} watt m^{-2} Hz^{-1}, que es una cantidad insignificante. Para que a distancias interestelares se pudiera detectar esta radiación por los métodos convencionales, tendría que aumentarse su potencia unas 10^8 veces. ≪ Sin embargo, como ya dijimos en el capítulo 27, con los métodos de correlación cruzada a bandas de frecuencia muy grandes, resultaría posible la escucha aunque las señales fueran mucho más débiles que el ruido. ≫

Las señales a grandes distancias destinadas a otra civilización se podrían detectar en la Tierra solamente si nuestro planeta estuviera accidentalmente interpuesto en la trayectoria de la dirección de las ondas de radio entre las dos civilizaciones galácticas comunicantes.

Según Von Hoerner, la probabilidad de esa intercepción casual, es igual a $(\pi/120)\, q^3 \beta^2 n^2$, siendo β el ancho del haz de las antenas emisora y receptora (supuestas idénticas), n el número de vecinos con los cuales mantiene contacto cada civilización y q la relación entre la distancia a que puede captarse la señal y la distancia a la que se puede interpretar positivamente. La cantidad q es siempre menor que la unidad, puesto que es más fácil recibir una señal que descifrarla. Es curioso que las probabilidades de intercepción no dependen de L, ni de d.

Suponiendo que la probabilidad de intercepción es suficiente para ga-

rantizar la organización de un servicio de escucha (si, por ejemplo, esta probabilidad es de 1/2), que $q = 5$ y $\beta = 1$ minuto de arco (que corresponde al ancho del haz de los telescopios grandes corrientes), resulta n igual a 1300, es decir, que sólo se interceptarían las señales accidentalmente si cada civilización estuviera tratando de conversar simultáneamente con 1300 vecinos, lo cual parece inverosímil. Si necesitamos que la probabilidad de intercepción sea de 1/2 y hacemos n tan pequeño como 50, q tiene que ser igual a 10 y $\beta = 10$ minutos de arco, lo cual sigue siendo muy poco probable.

Podemos presumir, en consecuencia, que la probabilidad de escuchar por casualidad las señales de una comunicación a grandes distancias, es muy remota.

Una señal de advertencia tiene por objeto atraer la atención de otra civilización desconocida. ≪ Tal señal podría ser por los marcadores atómicos del espectro estelar de que se habló en el capítulo 28. ≫ Hay hoy día un interés creciente sobre las características más probables de las señales interestelares. Estas señales han de cumplir dos requisitos: Llamar la atención y ser, a la vez, económicas. El consumo de energía y el de otras fuentes tiene que ser mínimo, si bien la distancia a que puedan detectarse tiene que se máxima. Es claro que los criterios sobre economía que a nosotros nos pueden parecer naturales, con nuestra civilización terrestre, quizá no los conceptúen igual los de otras sociedades avanzadas.

Son varios los métodos que podrían emplearse para esa señal de advertencia. Para cada método se puede hacer un cálculo aproximado de cierto coste equivalente, C, precio que hay que pagar para que la probabilidad P_d de detectar la señal a la distancia d durante el tiempo t_d sea suficientemente grande. Podemos suponer, por ejemplo, que $P_d = 1/2$, $d = 1000$ años luz y t_d del orden de varios cientos de años. Luego se elige entre los distintos métodos del que da los mínimos valores aceptables del coste, C.

Supone Von Hoerner que la cantidad C sería mínima si toda la potencia se envía en un haz compacto dentro de un intervalo de frecuencia determinado que de antemano pueda conjeturar la civilización desconocida que lo ha de recibir. En el capítulo 27 consideramos la idea de Cocconi y Morrison de que la más racional de todas las frecuencias para la comunicación interestelar es la natural de 21 cm de la raya del hidrógeno. ≪ También vimos las objeciones a esta elección de frecuencia y las posibles alternativas. ≫ A fin de reducir C, también podemos elegir una distribución óptima para la potencia transmitida, tanto en el espacio como en el tiempo. El modo de comunicación podría ser por modulación de las señales, bien sencillo, racional y fácil de comprender por la civilización que las recibiera. Puesto que el tiempo de espera para la respuesta sería bastante largo, los mensajes iniciales contendrían probablemente cantidades significativas de información, así como orientaciones sobre las señales. El contenido de la información podría estar incluido en el espectro completo de la señal transmitida —por modulación, por ejemplo— o por una indicación de una banda de frecuencia aparte por la cual se manda la información.

Habría que prestar atención a la banda de información del siguiente modo: la señal de advertencia podría consistir en un número grande de señales, transmitidas a varias frecuencias fijas simétricas respecto a cierta otra central. Al aproximarse a esa frecuencia central, el espaciado entre señales contiguas sería cada vez menor y las propias señales podrían tener bandas de emisión cada vez más estrechas. De esta forma se resaltaría que la frecuencia central tiene un significado especial. ≪ (Véase en el capítulo 27 el comentario sobre CTA 102, pág 441.) ≫ La información podría transmitirse a esta frecuencia a intervalos de tiempo definido, quizá una vez cada varios años, aunque esos intervalos no tendrían por qué ser forzosamente múltiplos de años, meses o días terrestres. La primera información transmitida contendría probablemente una introducción a la lingüística interestelar, es decir, al lenguaje seleccionado por la civilización emisora para la comunicación clara de la información.

≪ ¿Pero cómo es esto posible? Supongamos que tuviéramos que reconocer una señal de advertencia e identificar correctamente la frecuencia de los canales de comunicación. Podríamos hallar una señal modulada de origen, sin duda, racional si, por ejemplo, pudiéramos representarla como una sucesión de ceros y unos o de puntos y rayas. Un cero y un uno podrían representar las señales de dos frecuencias contiguas; la diferencia entre un punto y una raya podría ser, como en el alfabeto Morse, la longitud del pulso. Los ceros y los unos nos podrían llegar a gran velocidad dado que la civilización emisora es probable que esté mucho más avanzada que la nuestra. Podríamos grabar la información, quizá en cintas magnéticas, reproducirla a velocidad inferior a la que fue transmitida y hacerla patente por algún sistema convencional de representación, tal como, por ejemplo, ceros y unos. Debido a la rotación de la Tierra, la región del cielo de la cual procediera la señal no sería siempre accesible a nuestros mayores radiotelescopios ni a los telescopios ópticos empleados para la captación de esta hipotética transmisión interestelar. Recibiríamos un mensaje largo, pero fragmentado, de terminación brusca cuando la fuente de radiación radio u óptica se ocultara por el horizonte del observatorio. Al día siguiente reaparecería la fuente y volvería a captarse el mensaje por algún punto de su transmisión. Con paciencia, recopilación de datos y análisis, llegaríamos a encontrar, por ejemplo, que se repetía una serie común de ceros y unos, como por ejemplo, la serie de 551 ceros y unos de la figura 30-1.

≪ Una civilización técnica avanzada está tratando de comunicarse con nosotros. ¿Qué podemos hacer para entender lo que están diciendo? Lo más probable es que no hablen nuestras lenguas. La evolución histórica de ellos es distinta a la nuestra. Están en un planeta en el que quizá el medio ambiente es totalmente distinto. Sus modos de pensar, costumbres y valores culturales pueden ser contrarios del todo a los nuestros. A primera vista es tan improbable que pudiéramos entender la transmisión como que su primer mensaje dijera: "¿Son ustedes individuos presbiterianos?"

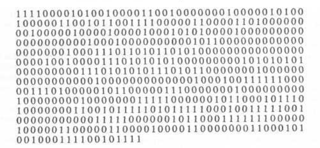

11110000010100100001100100000000100000010100
100000110010110011110000011000011010000000
00100000100000100000100010101000001000000000
000000000001000100000000000001011000000000000
0000000100011101101011010100000000000000000
0000100100001110101010100000000000010101010101
00000000011101010101110101100000000010000000
0000000000001000000000000000001000100111111000
001110100000010110000000111000000000100000000
1000000000100000000111111000000010110001011 10
10000000110010111110101111100010011111001
0000000000001111100000001011000111111100000
10000001100000110000010000011000000000110001 01
0010001111001011 11

Figura 30-1. Hipotético mensaje estelar original de Frank Drake. Los 551 ceros y unos son representaciones de las dos variedades de señales contenidas en el mensaje. El problema consiste en convertir esta sucesión de 551 símbolos en un mensaje inteligible, sabiendo que previamente no ha habido comunicación entre la civilización transmisora y la receptora.

⩽ Si se analiza un momento este problema, resulta evidente que la transmisión inicial de palabras, no importa cuán simples sean, en la lengua de la civilización transmisora, no tendría utilidad para la comunicación interestelar. Lo que necesitamos es algo gráfico. El valor de adaptación visual es muy grande y, como ya dijimos en el capítulo 24, hay buenas razones para creer que los receptores de radiación biológica extraterrestre tienen que operar a frecuencias visibles. Puesto que tanto la civilización transmisora como la receptora es muy probable que se "vean" en algún sentido, los mensajes primeros tendrían que ser gráficos.

⩽ De acuerdo con la primera conferencia científica celebrada en los Estados Unidos sobre vida racional extraterrestre (capítulo 29), Frank Drake envió por correo a cada uno de los participantes el hipotético mensaje interestelar de la figura 30-1 invitándoles a que lo resolvieran. No habíamos hablado del contenido probable de los primeros mensajes interestelares y ni siquiera habíamos llegado a un acuerdo de que algo gráfico fuera lo más probable para el inicial. Los participantes aceptaron el reto con distinto grado de éxito, aunque ninguno llegó a descifrar el mensaje. A fin de representar de modo más real las probables circunstancias concurrentes en la recepción del primer mensaje interestelar, yo preparé uno idéntico al de Drake, pero faltando uno de los ceros. Los canales de radio u ópticos son ruidosos y no se puede esperar una fidelidad perfecta de la retransmisión después de recorrer distancias interestelares. Si el mismo mensaje se repite muchas veces, comparando todos ellos entre sí, se verán enseguida los lugares de error, técnica

que dicho sea de paso, es probable que emplee la célula para descifrar las instrucciones del material genético. (Véase el capítulo 14.) Este mensaje alterado fue examinado por un grupo de eminentes físicos, químicos y biólogos reunidos en una sesión privada en Cambridge, Massachusetts. Aunque se pasaron varias horas tratando de descifrar el mensaje y a pesar del hecho de que pronto llegaron a la idea de la transmisión de una imagen visual no descifraron el mensaje alterado. Cuanto más largo sea un mensaje, más grande es el riesgo de que un error en la transmisión o en la recepción haga confundir la parte principal del mismo. En consecuencia, tanto para asegurar la fidelidad del contenido como por tener en cuenta la circunstancia de la imposibilidad del planeta receptor de observar con sus telescopios la señal durante todo el período de rotación, los mensajes deberían repetirse varias veces.

⩽ Con esta advertencia, se invita al lector a que compruebe en la figura 30-2 el mensaje descifrado. La exposición razonada que preparó Drake de este mensaje y su contenido es la siguiente:

El primer paso para la resolución de este mensaje es determinar, si es posible, el número de dimensiones en que está escrito. Si es unidimensional, será como un telegrama corriente; si es bidimensional, será como una imagen convencional de Televisión, aunque se podrían emplear otras coordenadas que no fueran las cartesianas, etc. No hemos de esperar que el número de dimensiones sea grande, sencillamente porque la facilidad del descifrado exige pocas. Para avanzar en esto, se podría ver en qué factores se puede descomponer el número 551. El resultado revela que 551 es solamente el producto de 19 y 21, ambos primos, como es natural. Esto es una buena indicación de que el mensaje es bidimensional. El tanteo con coordenadas cartesianas muestra que dividiendo el mensaje en 29 grupos y 19 caracteres y ordenándolos como en un barrido de líneas convencional de televisión, dan la clara imagen que, evidentemente, corresponde a la interpretación correcta del mensaje. ⩽ La ordenación en 19 grupos de 29 caracteres da el resultado sin sentido que aparece en la figura 30-3. ⩾

La interpretación del cuadro es como sigue:

1°. La figura de la criatura humana de la parte baja es, evidentemente, un dibujo del ser que envía el mensaje. Vemos que se parece a los primates, con un abdomen mayor que el nuestro y que tiene las piernas más abiertas que nosotros. Su cabeza es también más puntiaguda que la nuestra (o tiene además una antena sencilla). Por su aspecto, podemos conjeturar que en el planeta a que pertenece, la aceleración de la gravedad es mayor que en la Tierra.

2°. El cuadrado grande del vértice superior izquierdo acompañado por nueve objetos menores dispuestos en línea a lo largo de su borde izquierdo, es un boceto del sistema planetario de esa criatura. Vemos que hay cuatro planetas pequeños, uno mayor, dos más grandes, otro intermedio y al final otro pequeño. El sistema, pues, se parece al nuestro en su morfología básica.

PARRAFO 2. Números clave

- = 1
- - = 2
- - - = 3 etc.

A partir de esta transmisión, la civilización receptora sabría el símbolo de la igualdad y las designaciones en Lincos para los números ordinales. ¿Podría en realidad encontrarle sentido a esa transmisión la civilización receptora? Creemos que si una civilización extraplanetaria fuera capaz de construir el aparato para captar esas señales, con toda seguridad podría descifrar un mensaje basado en un sistema de lenguaje tan sencillo. Cualquier confusión que quedara respecto al contenido de los dos primeros párrafos, tendería a resolverse en el siguiente:

PARRAFO 3. Adición

1 + 2 = 3
1 + 3 = 4
2 + 3 = 5 etc.

De la misma forma se transmitirían las lecciones sobre resta, multiplicación y división. Gradualmente se irían tocando los temas más complicados de las matemáticas, el trascendental número π, la base de los logaritmos naturales, el álgebra, el cálculo diferencial y el integral y todo el análisis. La geometría podría transmitirse por imágenes en combinación con palabras en Lincos.

Durante este curso de matemáticas, la civilización que lo recibiera se vería de por sí introducida en numerosos conceptos importantes, tales como "semejante a", "mayor que", "menor que", "distinto de", "es verdad que", "no es verdad que", "como ejemplo", "máximo", "mínimo", "incremento", "decremento" y hasta la incalculable frase matemática "se demuestra fácilmente que". Cada uno de estos conceptos sería de utilidad para la civilización receptora para descifrar la siguiente información.

De acuerdo con Freudenthal, el Lincos podría también transmitir ideas más complejas que caracterizan a la naturaleza humana, por ejemplo, "perspicacia", "cobardía", "enfado" o "altruísmo", transmitiendo funciones teatrales entre personajes imaginarios, ≪ una especie de Ratón Mickey cósmico. ≫ Al principio tales representaciones serían solamente de carácter matemático. Ilustrémoslo:

CURSO: Fundamentos del comportamiento humano
TEMA: Diferencias en capacidades matemáticas
(Un hombre hablando a otro se indica simbólicamente por →)
A → B : ¿Cuánto es 2 + 3?
B → A : 2 + 3 = 5
A → B : Bien

En una serie de escenas análogas aparece el hombre C,
A → B : ¿Cuánto es 15 × 15?
B → A : 15 × 15 = 220
A → B : Mal
A → C : ¿Cuánto es 15 × 15?
C → A : 15 × 15 = 225
A → C : Bien
C es más listo que B

≪ Esto último es probablemente un aparte al lector cósmico. ≫

Después de esta transmisión se podría describir una serie de interacciones más complicadas. Más pronto o más tarde, la civilización receptora se daría cuenta de que se había hablado de algo más que de matemáticas; que se había transmitido al espacio las representaciones teatrales que llevaban los conceptos de las emociones, ≪ las costumbres sociales y una amplia gama de posturas filosóficas. ≫

Hemos dicho ya que la información lingüística podía transmitirse también con información gráfica. Especialmente en la transmisión de datos científicos, se podría hacer perfectamente ese acoplamiento. Por ejemplo, la tabla periódica de Mendeleiev de los elementos podría representarse por figuras acompañadas de las correspondientes palabras en Lincos. ≪ En la figura 30-2 vemos como las representaciones convencionales de los núcleos con sus correspondientes electrones se podrían transmitir al espacio. El número y distribución de los electrones es claro que indicarían la naturaleza del átomo. ≫ Entonces, se podría transmitir un gráfico del número de protones del núcleo en relación al número de neutrones. ≪ Para entonces, es discurso cósmico está bien avanzado en física atómica y nuclear. ≫

Sería bastante sencillo transmitir constantes físicas, astronómicas y químicas. La unidad de longitud se podría expresar en función de la longitud de onda de la transmisión y todas las demás unidades lineales serían fracciones o múltiplos de ese módulo básico. La unidad de masa podría ser la del electrón; la de tiempo definirse en función de la velocidad de la luz (≪ por ejemplo, el tiempo para que la luz recorra una distancia igual a la longitud de onda de la transmisión ≫). Así, económicamente, se podría transmitir información científica muy compleja.

Queremos hacer resaltar que un sistema lingüístico basado en estos fundamentos sería bastante más fácil descifrarlo, que muchos de las civilizaciones antiguas que han sido descifrados por los arqueólogos.

31

Contacto interestelar por vehículos sonda automáticos

. . . Tan profundo es el convencimiento de que tiene que haber vida más allá, al otro lado de las tinieblas, que se piensa que si están más adelantados que nosotros, pueden cruzar el espacio en cualquier momento, quizá en nuestra generación. Luego, pensando en la infinidad del tiempo, se pregunta uno si acaso sus mensajes no llegaron hace mucho tiempo, lastimando los pantanos cenagosos de los bosques de brasas humeantes, trepado el brillante proyectil por reptiles sibilantes y dejado de funcionar neciamente los delicados instrumentos sin dar nada a conocer.

Loren Eiseley, *The Inmense Journey* (1957)

En la consideración del contacto con civilizaciones estraterrestres avanzadas, resulta claramente crítica la distancia media entre civilizaciones. Si esa distancia media a la civilización más próxima es aproximadamente de 10 años luz, como suponen Cocconi y Morrison y también Townes y Schwartz, hemos visto en los capítulos 27 y 28 que parece factible el contacto de civilizaciones que estén al nivel contemporáneo de la tecnología terrestre. ≪ Pero también vimos en el capítulo 24 que sólo hay cinco sistemas de estrellas de aproximadamente tipo espectral solar dentro de los quince años luz, es decir, α Centauri, ϵ Eridani, 61 Cygni A, ϵ Indi y τ Ceti. ≫ En consecuencia, sería relativamente fácil establecer si alguna de estas estrellas estuviera enviando señales ópticas artificiales de radio hacia nosotros o en nuestra dirección.

Por otra parte, supongamos (como parece muy probable, en base a lo expuesto en el capítulo 29) que la distancia media entre civilizaciones técnicas es de unos cuantos cientos de años luz. El caso entonces es totalmente distinto; hay ahora miles de estrellas con posibles planetas poblados. Parece probable que habría que observar durante mucho tiempo muchas estrellas para determinar si alguno estaba transmitiendo señales artificiales. Habría que realizar una amplia "operación de observación de estrellas". La captación de señales artificiales, aun en los casos más sencillos, es una tarea difícil e intrincada, ≪ a nuestro nivel actual de avance, siempre que no escuchemos a una civilización mucho más avanzada. ≫ Y resultaría inconmensurablemente más difícil que, a lo largo de siglos y milenios tuviéramos que enviar haces de radiación electromagnética con gran precisión a decenas de miles de estrellas mientras esperaban pacientemente y, a lo mejor en vano, una respuesta. Y hemos de tener presente que quizá las civilizaciones extraterrestres ni siquiera mandan los pulsos radio u ópticos en la dirección de nuestro sistema solar. A lo mejor, por razones que ellos sabrán, han excluido nuestro Sol entre el vasto número de estrellas en las que creen podría haber planetas habitados. . .

≪ Vimos en el capítulo 29 cuánto depende el número de civilizaciones en la Galaxia y, por tanto, las distancias entre ellas, de L, tiempo de vida de la civilización técnica. Llegamos, por dos análisis diferentes, al resultado de que la distancia probable de nosotros a la civilización técnica más cercana esta comprendida entre unos cuantos cientos de años luz y quizá 1000 años luz. Pero, hacemos de nuevo hihcapié en que el intervalo de incertidumbre es grande. Si la vida media de una civilización técnica es comparable con la de su estrella, en nuestra Galaxia puede haber mil millones de civilizaciones. Si la vida media es sólo de unas cuantas décadas, la nuestra puede ser la única civilización de la Galaxia y hasta un esfuerzo máximo para detectar señales

de una civilización extraterrestre — en las pocas décadas que nos quedan — resultaría infructuoso.

≪ Mas supongamos que la civilización más próxima se encuentra a 1000 años luz. La separación media entre estrellas en la vecindad solar es $d_0 \sim 2{,}3$ parsecs, ó $2{,}3 \times 3{,}26 \sim 7{,}6$ años luz. Luego el número de estrellas en un volumen de radio igual a 1000 años luz es $(4\pi/3)\ (1000/7{,}6)^3$; como unos 10 millones. Aunque limitáramos la búsqueda a las estrellas de tipo espectral parecido al del Sol, habría más de un millón de candidatas. ≫ ¿Cómo podemos predecir cuál de esas estrellas tiene un planeta habitable en el que haya vida racional? A la vista de esta posición, Ronald Bracewell ha propuesto otro medio de establecer contacto.

Bracewell parte de que, en general, el desarrollo de una civilización avanzada técnicamente tiene que ir acompañado de gran progreso en cohetes y demás tecnología sobre naves espaciales. Relativamente al principio de su existencia, la civilización sería capaz de enviar sondas interestelares pequeñas, gobernadas automáticamente, a las estrellas más cercanas y de colocarlas automáticamente en órbitas casi circulares alrededor de sus objetivos.

En la Tierra ya se están produciendo grandes avances en tecnología espacial. ≪ Los sistemas de dirección desarrollados permitieron los vuelos por la Luna del Luna III y el Zond III, los impactos lunares precisos, por ejemplo, del Ranger IX y el Luna IX, el alunizaje el 16 de julio de 1969 del módulo Eagle del Apolo XI por primera vez en la historia y los posteriores del programa Apolo; los vuelos de los Mariner cerca de Venus, Marte y Júpiter, etc. Existen sistemas de dirección que nos permiten colocar satélites artificiales en órbita alrededor de la Luna, ≪ como el Luna X. ≫ Las técnicas de dirección comprenden la transmisión de señales para enmendar el rumbo de la trayectoria de la nave espacial. Algún día, ≪ quizá bastante pronto, ≫ se aplique esta tecnología a poner en órbita alrededor de los planetas satélites artificiales; a lo mejor, primero Venus y luego Marte. Con el tiempo, se podrán enviar vehículos sonda automáticos a las estrellas más cercanas, y se convertirán en satélites artificiales de las mismas.

Tras la iniciación de ese programa de exploración interestelar, sólo se precisará de unos pocos siglos para colocar uno de tales vehículos en órbita alrededor de todas las estrellas en las que sea posible haya planetas habitables y que se encuentren dentro de un radio de 100 años luz del Sol. Las velocidades de esas sondas podrán llegar a 1 ó 2×10^5 km s^{-1}, que aun siendo muy grandes, son inferiores a la de la luz para evitar los efectos de la relatividad ≪ que se describen en el capítulo 32. ≫ Las sondas, claro está, llevarían receptores y emisores de radio de larga duración, cuya energía podría proceder de la luz de la estrella alrededor de la cual estuviera en órbita el satélite.

Son numerosas y distintas las ventajas de los contactos de este tipo. ≪Una vez en órbita alrededor de la estrella local, la sonda procuraría automáticamente establecer contacto con los planetas habitables de su vecindad. ≫ Puesto que los instrumentos de la sonda estarían activados por la energía de la estrella local, la señal que transmitieran sería mucho más potente que otra

enviada directamente desde la Tierra; además, recorrería hasta el planeta habitado una distancia mucho más corta. ≪ En el caso de contacto óptico, esto podría evitar la dificultad que expusimos en el capítulo 28 (es decir, la necesidad de que el haz laser cubriera una fracción significativa del sistema solar local para que tuviera allí la probabilidad de detectarse). ≪ Y, además, esa exploración interestelar no precisa de que sociedades inteligentes extraterrestres estén llevando a cabo continuamente la intensa búsqueda por el cielo de señales procedentes de las estrellas adecuadas. Finalmente este programa no depende de una selección específica de longitudes de onda, tal como la banda de los 21 cm.

Este programa, propuesto por Bracewell, podría ponerse en ejecución del modo siguiente: en la estrella de destino, la sonda investigaría las regiones circundantes del espacio en busca de transmisión radio monocromática. Esa investigación podría cubrir un amplio margen de frecuencias. En caso de detectar señales, la sonda las registraría e inmediatamente las retransmitiría intactas a la fuente de procedencia. Esta especie de rebote continuado, sin duda que llamaría la atención a los habitantes planetarios. ≪ La recepción de un serial de televisión para las amas de casa, procedente del espacio interplanetario, interesaría sin duda a los radioastrónomos terrestres. ≫ Como resultado, se alcanzaría una meta muy importante: la sociedad extraterrestre descubriría la presencia de un mensajero llegado de una civilización lejana.

Después que se hubiera establecido el contacto con la sonda en ambos sentidos, ésta enviaría un mensaje preparado previamente con información más compleja. La televisión sería muy provechosa. Por ejemplo, la sonda podría transmitir al planeta una imagen televisada de la constelación en la cual está localizada su estrella de origen, ≪ es decir, el Sol en este caso. ≫ Es claro que de antemano tendríamos que saber cómo se ve el Sol en el cielo del planeta de destino. ≪ Después, se podría transmitir un gran volumen de información de la sonda al planeta por los sistemas sugeridos en el capítulo 30. ≫

Tan pronto como los habitantes del planeta con el que se hubiera hecho contacto supieran de la presencia de seres racionales cerca de una estrella determinada de su cielo, podrían comenzar su propia investigación intensiva. Quizá enviaran emisiones ópticas y radio moduladas y también sus propias naves sonda automáticas en la dirección de esa estrella. Cabe concebir que al cabo de unos siglos hubiera un contacto activo entre esas civilizaciones separadas por una distancia, digamos por ejemplo, de unas cuantas decenas de años luz.

≪ Obsérvese que para que el contacto se establezca, no hace falta que la sonda nos informe del éxito de su misión; si este es el caso, la civilización detectada será la que se dé a conocer. ≫ El volumen de información contenido en una sonda así, podría ser tan grande, que hasta el simple contacto unidireccional resultaría valioso.

También es posible concebir un sistema de estaciones relé para la retransmisión de las señales recibidas por el vehículo sonda. Los vehículos del

espacio interestelar empleados como estaciones relé transmitirían sucesivamente a la Tierra la información adquirida.

≪ Al principio, sólo se podrían investigar con las sondas interestelares las civilizaciones relativamente cerca entre sí. ≫ Sin embargo, podemos suponer que las civilizaciones altamente avanzadas investigarían el espacio de un modo sistemático sin duplicación innecesaria de los contactos. Y como resultado final, es posible postular la existencia de una vasta red de civilizaciones racionales en mutuo contacto productivo.

≪ Un universo así, en el cual el contacto físico se efectuara solamente por los vehículos sonda interestelares automáticos de alcance relativamente corto, tendría algunas propiedades interesantes. Por ejemplo, es de suponer que en esos vehículos podrían transportarse objetos materiales a las civilizaciones de las estrellas vecinas. El intercambio de artefactos culturales — obras de arte, por ejemplo — tendría una influencia saludable sobre el mantenimiento de los contactos. Tales artefactos podrían en realidad transportarse por relevos a enormes distancias mediante ferries interestelares automáticos pertenecientes a multitud de civilizaciones. Durante largos períodos de tiempo esos objetos tenderían a difundirse sobre grandes distancias dentro de la Galaxia y la probabilidad de encontrarlos lejos de su procedencia sería pequeña. Si la autonomía de los vehículos espaciales interestelares fuera sólo de unas decenas de años luz, no cabría esperar encontrar artefactos terrestres cerca del centro galáctico. Si se emprenden viajes interestelares a distancias superiores a esas decenas de años luz, entonces, esa difusión artificial tenderá vagamente a conectar civilizaciones con niveles de desarrollo técnico y artístico grandemente diferentes. Ocasionalmente podría llegar a nosotros un objeto de belleza increíble o de fuerza devastadora, que no fuéramos capaces de interpretarlo ni de reproducirlo. Hasta en una civilización técnica tales artefactos podrían convertirse en objetos de culto. Circunstancias semejantes y una mitología anexa total se han desarrollado en condiciones análogas en el culto a los cargos contemporáneos en Nueva Guinea — ejemplo de contacto por difusión de artefacto entre civilizaciones a niveles de avance tecnológico muy diferentes. ≫

Debido a la posible realidad de que efectivamente haya actualmente sondas interestelares, Bracewell cree que es muy importante para nosotros investigar concienzudamente todas las señales de radio de origen cósmico. Hay cierta posibilidad de que sondas procedentes de remotas civilizaciones galácticas estén ya presentes dentro de nuestro sistema solar. A este respecto, Bracewell ha llamado la atención sobre ciertos fenómenos conocidos muchos años ha, pero que nunca se han explicado satisfactoriamente. Por ejemplo, en la década de los 1930, Störmer y Van der Pol ≪ en un trabajo pionero de la propagación atmosférica de radioondas, ≫ detectaron varios casos de radioeco inexplicable. El lapso de tiempo hasta la llegada de la señal reflejada era de bastantes segundos y, a veces, hasta de un minuto, lo que da a entender que la reflexión tenía lugar en algún objeto a una distancia de la Tierra como de un millón de kilómetros, ≪ que es una distancia interplanetaria respetable. ≫

¿Podrían ser esos ecos curiosos las transmisiones de algún vehículo automático perteneciente a un mundo lejano? No hemos de olvidar que en el pasado los observadores terrestres perdieron señales radiocósmicas de gran intensidad, tales como las de Júpiter, con una potencia de aproximada de 1000 watt Hz^{-1}, detectadas tantas veces en los últimos decenios, aunque no se identificaron como emisión jovial hasta 1954.

Si la investigación meticulosa no conduce al cabo de muchos años a la detección de señales radio artificiales, podemos llegar a la conclusión de que la sociedad técnica avanzada más cercana está tan apartada de nosotros, que no podemos establecer contacto. Por ejemplo, podría ser que la vida media de una civilización técnica fuera de unos 1000 años y la distancia media entre civilizaciones de unos 2000 años luz. Es claro que en tales circunstancias no sería probable el contacto ≪ recíproco ≫ entre ambas civilizaciones. Por otra parte, el caso sería totalmente distinto si la vida media de la civilización técnica fuera de unos 10^7 años y la distancia media entre civilizaciones aproximadamente de 100 años luz. Entonces, después de algunos millones de años de desarrollo técnico, una civilización podría alcanzar su máximo y desde él investigar con facilidad varios miles de estrellas vecinas, entre las cuales, al menos una, estaría habitada por una sociedad técnica avanzada.

En el caso de que sea larga la vida de una civilización técnica, puede haber alcanzado un nivel de competencia excepcionalmente avanzado y ser capaz de establecer contacto con civilizaciones que están de ella a miles de años luz. Hasta las regiones más remotas de la Galaxia se podrían investigar por medios directos. No podemos decir qué métodos de investigación usarían esas civilizaciones tan avanzadas — habría una gran diferencia entre su nivel de desarrollo y el nuestro. Quizá las civilizaciones en estado embrionario, como la de nuestro mundo, carezcan de interés para ellas. Podrían subestimarnos, considerando innecesario investigar todas las civilizaciones primitivas que, como mariposas, pasan por baquetas desde el nacimiento hasta la muerte en un solo instante.

(≪ Respecto a este punto, en la edición rusa de esta obra, Shklovskii expresa su creencia de que las civilizaciones no están inevitablemente predestinadas a la autodestrucción a pesar de su descripción de la literatura occidental contemporánea como llena de detalles de holocausto atómico. Expresa su creencia de que mientras en la Tierra exista el capitalismo, está latente el fin violento de la vida racional en el planeta. Hay razón para creer, asegura él, que las sociedades pacíficas futuras se levantarán basadas en el comunismo. Me puedo imaginar distintos escenarios para el futuro. Nadie vive hoy en una sociedad que se parezca de cerca al capitalismo de Adam Smith, ni al comunismo de Karl Marx. Las dicotomías políticas del siglo XX quizá no parecieran a nuestros antepasados remotos más agotadoras del margen de posibilidades para el futuro entero de la humanidad que lo que representan para nosotros las alternativas de las guerras religiosas de Europa de los siglos XVI y XVII. Como dice Shklovskii, las fuerzas de la paz en el mundo son grandes. No es probable que la humanidad se destruya a sí misma. Queda mucho por hacer. ≫)

32

Contacto directo entre civilizaciones galácticas

"De nada sirve probarlo" dijo ella, "*no se puede* creer en cosas imposibles".

"Me atrevería a decir que no has tenido mucha práctica", dijo la reina. "Cuando yo tenía tu edad, siempre lo hacía media hora al día, por lo cual, a veces, llegaba a creer hasta seis cosas imposibles antes de desayunar".

Lewis Carroll, *Alicia en el país de las maravillas*

"¿Qué importa cuán lejos vayamos?" replicó su ruin amigo. "Tú sabes que hay otra tierra al otro lado". "Cuanto más lejos de Inglaterra, más cerca está Francia; luego, no desfallezcas, querido caracol, y ven y participa del baile".

Lewis Carroll, *The Lobster Quadrilla*

≪ Entre las distintas formas de efectuar la comunicación interestelar, hemos considerado los vehículos sonda interestelares automáticos de alcance más bien limitado y los métodos electromagnéticos a distancias algo mayores. Las dificultades de la comunicación electromagnética a distancias interestelares son grandes. Una simple pregunta y respuesta a la civilización técnica que se supone más cercana, necesitaría períodos que se acercarían a los 1000 años. Una conversación prolongada - o incluso una transmisión unidereccional a una comunidad particularmente interesante al otro lado de la Galaxia - ocuparía intervalos de tiempo mucho mayores, del orden de 10^4 a 10^5 años. La comunicación electromagnética presupone que la elección de la frecuencia de la señal es conocida por todas las comunidades. En el capítulo 27 vimos que ha habido bastante desacuerdo respecto a las asignaciones de frecuencia de transmisión incluso en nuestro propio planeta. Entre las comunidades galácticas, podemos suponer todavía mayores diferencias de opinión respecto a lo que es evidente y a lo que no lo es. ≫

Si efectivamente hubiera una falta de coordinación en la longitud de onda de cada patrón - incluso si ésta fuera un submúltiplo o múltiplo de 21 cm - a las sociedades extraterrestres les resultaría muy difícil detectar las señales. Además, si el contacto por radio se intentara entre civilizaciones distantes entre sí más de 2000 ó 3000 años luz y si la radiación de la comunicación tuviera que pasar relativamente cerca del plano galáctico, la señal artificial se vería absorbida por el medio interestelar. Esa absorción podría disminuir significativamente separando ligeramente (1 a 2 megaciclos por segundo) la señal de la frecuencia del hidrógeno neutro (1420 megaciclos s^{-1}), aunque esto volvería a complicar la búsqueda.

≪ Por ingenioso que sea el método, hay ciertas limitaciones al carácter de la comunicación efectuada con una civilización extraña mediante radiación electromagnética. Con los miles de millones de años de evolución biológica y social independientes, los procesos del pensamiento y los hábitos de dos comunidades cualesquiera, tienen que diferir grandemente. Aunque en el capítulo 30 nos pareció probable a nosotros que las transmisiones de representaciones pictóricas y los lenguajes artificiales como el Lincos serían fáciles de entender por civilizaciones extrañas, esto no es más que una conjetura. No sabemos que suposiciones ocultas hay en nuestro canal de comunicación propuesto, suposiciones que no podemos valorar por lo íntimamente que están entretejidas en la trama de nuestro pensar.

≪ Entre los antropólogos hay un cuento famoso que ilustra este punto:

≪ Un equipo de antropólogos formado por marido y mujer estaba estudiando pueblos contiguos en una remota isla del Pacífico. Un día, la mujer recibió un mensaje urgente que le llevó el portador de su marido, diciéndole que fuera en seguida. Llegó corriendo y encontró a su marido en éxtasis de regocijo antropológico. "Querida", le dijo "he descubierto algo maravilloso de la filosofía de los habitantes de este pueblo". Acercándose a uno de los indígenas, señaló hacia una palmera y le preguntó "¿qué es esto?"

El nativo respondió al pronto, digamos, por ejemplo, "Unga munga". A continuación, el antropólogo señaló a un cerdo que se revolcaba en el barro, al que daba la luz del crepúsculo. "¿Qué es esto?"

"Unga munga" respondió otra vez el informante, con idéntico tono de voz.

Finalmente, de modo triunfal, el antropólogo señaló hacia el jefe del pueblo y una vez más preguntó "¿Qué es esto?"

El respondedor replicó otra vez - al parecer, esta vez un tanto acongojado - "Unga munga".

"Ves - no distinguen entre las diferentes formas de vida. Su idioma incorpora la unidad de todas las cosas vivas", exclamó el antropólogo. "Querido", le dijo su esposa amablemente "preguntale cómo le llaman al dedo índice".

≪ Si mañana tuviéramos que establecer contacto interestelar por radio, me imagino esas dificultades ampliadas muchas veces.

≪ Como caso del potencial de dificultades de una clase menos sutil, podemos considerar el de los jeroglíficos egipcios. Este lenguaje no se descifró hasta después del descubrimiento de la piedra de Roseta, en efecto un diccionario selectivo en otras dos lenguas conocidas, demótico y griego. Pero antes, varias generaciones de lingüistas europeos habían intentado descifrar el cuerpo grande de la escritura jeroglífica de que disponían hasta entonces. Lo que es digno de mención, no es que sus pretensiones casi siempre resultaban infructuosas, sino que algunas de sus ideas fueron buenas. Si bien los jeroglíficos son principalmente silábicos, algunos de los primeros lingüistas creyeron que eran ideográficos e hicieron traducciones maravillosamente caprichosas en las cuales los pájaros, claro está, desempeñaban una parte principal. Los egipcios no escribieron sus inscripciones para provecho de otra civilización ignorante de su lengua. En comunicación interestelar intencionadamente se procurará que el contenido sea claro. Pero nuestros compañeros del discurso cósmico no serán seres humanos y está por ver si las matemáticas entran en la piedra de Roseta interestelar.

≪ La comunicación electromagnética no permite tres de las más excitantes categorías de contacto interestelar:

≪ (1) Contacto entre una civilización avanzada y otra racional, pero en estado social anterior al tecnicismo. ≫ Ese contacto sería de gran valor, porque el tiempo de vida de la era pretecnológica en muchos planetas puede ser bastante largo y su número en la Galaxia superar con exceso al número de sociedades avanzadas técnicamente.

≪ (2) La exploración directa de biologías no racionales extrañas del medio interestelar, de sistemas de estrellas exóticas y de la amplia variedad de fenómenos físicos inobservables desde las proximidades solares.

≪ (3) El intercambio directo de objetos materiales, entre civilizaciones distantes, incluyendo muestras biológicas.

≪ Si efectivamente es factible la comunicación electromagnética interestelar, existe la posibilidad de una especie de intercambio substituto de objetos materiales, a pesar del hecho de que sólo se intercambiarían fotones. Podríamos recibir, por ejemplo, instrucciones detalladas para la construcción de objetos materiales, un modelo a escala de las monedas de δ Pavonis 3, un utensilio doméstico de β Hydri 4, o quizá de un instrumento científico nuevo construido en 82 Eridani 2. Hasta es posible, como ha dicho Fred Hoyle, que recibiéramos instrucciones detalladas para el montaje del material genético de un organismo extraterrestre, incluso de un ser racional extraterrestre. ≫ Y aún entonces, pronto surgiría la demanda de intercambio físico real.

≪ En comunicación interestelar electromagnética, los comunicantes están bastante apartados, el aprendizaje es vicario y la duración del discurso larga. Pero si fuera posible, el vuelo espacial interestelar directo barrería todas estas dificultades; reabriría el campo de acción para las civilizaciones cuya exploración local se hubiera completado; proporcionaría el acceso a lugares más allá de las fronteras planetarias. Hemos expuesto ya la posibilidad del vuelo espacial interestelar automático. Tenemos que estudiar ahora la de vuelos tripulados por seres racionales, aunque no sea ésta la palabra más apropiada.

≪ Existen dos métodos básicos de alcanzar el vuelo espacial interestelar dentro de las características de duración de la vida humana. Uno supone el enlendar de las actividades metabólicas humanas durante los vuelos de mucha duración. Imaginemos que la sociedad ha llegado a un estado tal en el que son posibles los vuelos espaciales interestelares no relativistas rápidos, a velocidades, pongamos, del orden de 100000 km s^{-1} como un tercio de la velocidad de la luz. Un viaje de ida a un planeta distante 1000 años luz, duraría 3000 años o un poco más, considerando los períodos de aceleración y desaceleración. Un viaje de ida y vuelta al centro galáctico precisaría unos 60000 años. Si tales viajes llegan a ser factibles, el tiempo de vida de nuestra civilización tendría que ser superior al del viaje, pues de otro modo no quedaría nadie para regresar. El estudio de los inhibidores metabólicos está justo empezando en nuestro planeta. Como dijimos en el capítulo 19, es posible preservar una variedad de microorganismos durante grandes períodos de tiempo - quizá indefinidamente - enfriándolos rápidamente a temperaturas bastante bajas. La conservación a baja temperatura de la sangre y esperma humanos es ya una rutina, pero la de todo un cuerpo humano aún no se ha logrado nunca. La razón fundamental es ésta: la densidad del hielo es menor que la del agua. (Por esto flota el hielo en los estanques durante el invierno.) Por tanto, el hielo ocupa un volumen mayor que la misma masa de agua. (Por

esta razón, revientan las botellas llenas que se meten en el congelador.) En consecuencia, al congelar un animal tal como el ser humano, compuesto principalmente por agua, se injurian severamente sus células, lo mismo al congelarlo que al descongelarlo. En el primer caso aumentan los volúmenes de las células; se montan unas sobre otras y se rompe su estructura interna; en el segundo, tienen lugar unas contracciones equivalentes. Desde luego que se conocen productos químicos anticongelantes, pero es difícil saturar adecuadamente un ser humano con tales anticongelantes sin matarlo antes.

≪ Pero existen, con todo, posibilidades que todavía no se han explorado. A modo de ejemplo, consideremos la siguiente idea, desarrollada conjuntamente en coloquio mío con el biólogo sueco Carl-Gören Hedén, del Instituto Karolinska, de Estocolmo. La congelación, como acabamos de decir, a la vez que conserva también mata por la diferencia de densidad entre el hielo y el agua. Pero a presiones elevadas existen otras clases de hielo, con distintas estructuras cristalinas y distintas densidades a las del hielo común. A presiones de unas 300 atmósferas y temperaturas de —40° C o inferiores, el hielo común, llamado hielo I, se convierte en hielo II, variedad de agua congelada que tiene casi la misma densidad que en estado líquido. Si de forma segura se pudiera llevar el cuerpo humano - y mantenerlo - a una presión ambiental de varios miles de atmósferas y, entonces, enfriarlo rápidamente y con cuidado a temperaturas muy bajas, se podría preservar durante mucho tiempo. Esta es sólo una de las muchas posibilidades.

Parece posible que para la época en que los vehículos espaciales interestelares con velocidades de 10^{10} cm s^{-1} sean una realidad, también se dispondrá de los métodos para conservar mucho tiempo sus tripulaciones humanas. A partir de las mismas consideraciones que desarrollamos en el capítulo 15 al hablar de la supervivencia de la panspermia interestelar, se deduce que incluso para viajes muy largos - digamos, que se acerquen a los 10^5 años - la radiación cósmica de fondo no resultaría ser un peligro muy grave para la supervivencia de una tripulación dormida.

≪ Hay otro medio posible de lograr los vuelos espaciales interestelares a largas distancias, que no implica necesariamente a los inhibidores del metabolismo: es el vuelo espacial interestelar relativista.

≪ Se sabe desde hace cierto tiempo que existe un efecto notable, debido a la teoría de la relatividad, que desempeñaría una función importante en los vuelos espaciales a velocidades próximas a c, velocidad de la luz. El cómputo del tiempo, medido por la tripulación de un vehículo espacial, sería muy lento comparado con el medido por sus amigos, parientes y colegas en el planeta de origen. Cuando los pasajeros hubieran recorrido en su viaje distancias inmensas, de miles de años luz o más, a velocidades relativistas, apenas si habrían envejecido. (1) Este fenómeno de dilatación del

1.- N. del T. La dilatación del tiempo está relacionada con otro fenómeno, también consecuencia de la relatividad espacial, que es la *contracción de longitudes*.

tiempo relativista es una consecuencia concreta de la teoría de la relatividad espacial formulada por Albert Einstein, teoría cuyas otras predicciones se han comprobado repetidamente. También se tiene la confirmación experimental directa de la dilatación del tiempo. Por ejemplo, se conoce perfectamente el tiempo para que una partícula elemental denominada mesón mu se desintegre a velocidades no relativistas. Si, como resultado, por ejemplo, del bombardeo de rayos cósmicos de la atmósfera superior, un mesón mu tuviera que entrar en la atmósfera de la Tierra viajando a una velocidad próxima a la de la luz, pero con su tiempo de vida ordinario, no alcanzaría nunca la superficie terrestre y nunca se hubiera detectado. En cambio, los mesones mu se detectan corrientemente en la superficie, porque el tiempo para que se desintegren cuando se mueven a velocidades relativistas es mucho mayor que cuando se mueven a velocidades más lentas. No existe diferencia esencial entre el tiempo biológico y el tiempo físico; ambos están sometidos a las mismas leyes. A bordo de una nave espacial interestelar relativista, no solamente irían más despacio los relojes de los pasajeros que los de sus semejantes en la Tierra, sino que ellos mismos se moverían más lentamente, sus corazones latirían a menor ritmo, su conciencia del paso del tiempo se retrasaría. El vuelo espacial interestelar relativista es en realidad una especie de inhibidor metabólico, pero que actúa sobre toda la nave espacial.

La relación entre una magnitud L_0 en reposo y la que resulta, L', al medirla cuando está animada de una velocidad v, viene dada por la fórmula

$$L' = L_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

en la que c es la velocidad de la luz. El radical es el factor de contracción.

En la página 769 de la obra *Física*, de A. Tipler, Editorial Reverté, S. A., Barcelona, aparece la curiosa paradoja de los gemelos en relación con este tema.

Un hermano emprende un viaje a un planeta que dista de la Tierra 8 años luz. La velocidad que lleva (prescindiendo de los tiempos necesarios para aceleración y frenado) es $v = 0{,}8c$. Su hermano gemelo que permanece en la Tierra, cuenta que el tiempo que transcurre entre ida y vuelta hasta que el otro regresa es

$$t = 2\ \frac{8 \text{ años luz}}{0{,}8 \text{ luz}} = 20 \text{ años}$$

En cambio, para el que viaja, la distancia a recorrer se contrae según la fórmula anterior, resultando ser

$$L' = L_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = 8 \sqrt{1 - \frac{240000^2}{300000^2}} = 8 \sqrt{1 - \frac{5{,}76 \cdot 10^{10}}{9 \cdot 10^{10}}} = 8 \sqrt{0{,}36} = 4{,}8 \text{ años luz}$$

Esa distancia contraida, a la velocidad $0{,}8c$ tardará 6 años en recorrerla en cada parte del viaje, siendo por tanto 8 años *más joven* que su hermano gemelo cuando regresa a la Tierra. Su sorpresa y paradoja es que su hermano ha envejecido 20 años, cuando por "sus cuentas sólo le salían" 7,2 años pues desde su nave, considerando que su hermano se mueve respecto a él a $0{,}8c$ y teniendo en cuenta el factor de contracción, sus 12 años, para su hermano tendrían que haber sido solamente 7,2 años.

≼ Ilustremos el fenómeno de la dilatación del tiempo con un ejemplo concreto. Consideremos una nave espacial que viaja con una aceleración constante hasta el punto medio de su recorrido y que luego desacelera en la misma proporción hasta su destino. La aceleración elegida para el viaje sería probablemente la misma que la de la gravedad en el planeta de origen. Por ejemplo, en el planeta Tierra, la aceleración de la gravedad, que es la que experimenta cualquier cuerpo que cae libremente, es de 980 cm s^{-1}. Si la nave espacial se moviera animada de esta aceleración, llamada 1 *g*, los pasajeros humanos se sentirían tan bien como "en casa" y no tendrían ninguna sensación ni de movimiento, ni de aumento o ligereza de peso. Los habitantes de un planeta tipo jovial elegirían aceleraciones de quizá 2 ó 3*g*. A una aceleración de 1 *g* se tardaría sólo como un año en alcanzar una velocidad próxima a la de la luz. En cambio, la aceleración continuada no llevaría a la nave a una velocidad superior a la de la luz, sino que tendería simplemente a ser cada vez más próxima a su valor de 300000 km s^{-1}. Este límite a la velocidad, aunque desgraciado, en el contexto actual es inexorable. La imposibilidad de información o de objetos materiales que se muevan más deprisa que la luz es uno de los fundamentos más firmes de la física contemporánea.

≼ Con el plan de vuelo anterior, es entonces posible calcular el tiempo transcurrido, en años, por el cómputo realizado a bordo de la nave, para un viaje a un lugar distante *S* años luz de la Tierra. Estos cálculos se presentan en la figura 32-1 para tres aceleraciones de la nave, la de 1 *g*, la de 2 *g* y la de 3 *g*. Vemos que a la aceleración de 1 *g* la nave tarda sólo unos pocos años, por el tiempo de a bordo, en llegar a las estrellas más cercanas; 21 años para alcanzar el centro de la Galaxia y 28 años para llegar a la galaxia espiral más próxima más allá de la Vía Láctea. Con aceleraciones de 2 ó 3 *g*, se pueden hacer esas distancias en la mitad de tiempo. Desde luego que en el planeta de origen no hay dilatación del tiempo. El tiempo transcurrido allí, en años, es aproximadamente igual a la distancia al destino en años luz más el duplo del tiempo necesario para alcanzar velocidades relativistas. Este tiempo, a la aceleración de 1 *g*, es aproximadamente de un año. Para distancias superiores a los 10 años luz, el tiempo transcurrido en el planeta de origen, en años, es aproximadamente igual a la distancia al destino en años luz. Así pues, para un viaje de ida y vuelta con paradas intermedias en las estrellas más próximas, el tiempo transcurrido en la Tierra sería de unas pocas décadas; a Deneb, de unos siglos; al complejo de la constelación de la Vela, de unos pocos milenios; al centro galáctico, de decenas de miles de años; a M 31, la gran galaxia de Andrómeda, de unos millones de años; al conglomerado de galaxias de Virgo, de decenas de millones y, al inmensamente distante conglomerado de galaxias de Coma, de cientos de millones de años. Sin embargo, cada uno de estos enormes viajes podría realizarse dentro del tiempo de vida de una tripulación humana, debido a la dilatación del tiempo a bordo de la nave espacial.

≼ Es a estas inmensas distancias que aparece otra propiedad curiosa del vuelo interestelar relativista. Si por cualquier razón quisiéramos una comuni-

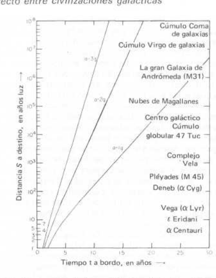


Figura 32-1. Ilustración de la capacidad de dilatación del tiempo en vuelo espacial interestelar. Se supone la nave con una aceleración uniforme de 1 *g*, 2 *g* ó 3 *g* hasta el punto medio de su viaje y a partir de él una desaceleración también uniforme. Se ve que con tales vehículos se pueden recorrer distancias inmensas, de millones de años luz y más, durante el tiempo de vida de su tripulación. Sin embargo, el tiempo transcurrido en el planeta de origen durante el mismo viaje ascendería a millones de años, medido con los relojes del planeta. (Cortesía de *Planetary and Space Science*, Pergamon Press, Londres.)

cación recíproca con los habitantes de alguna galaxia de las proximidades, podríamos probar la transmisión de señales electromagnéticas, o quizá incluso el lanzamiento de un vehículo sonda automático. Con cualquier método, el tiempo de transito a la galaxia sería, por lo menos, de varios millones de años. Para entonces, en nuestro futuro, podría no quedar civilización en la Tierra para continuar el diálogo. Pero si para tal misión se empleara el vuelo espacial interestelar relativista, la tripulación podría llegar a la galaxia en cuestión, quizá, de unos 30 años, lo cual les permitiría no

solamente cantar las canciones de la lejana Tierra, sino proporcionar la oportunidad para el discurso cósmico con los habitantes de una civilización ciertamente única y posiblemente extinguida. A pesar de los riesgos y duración del viaje, estoy convencido de que podrían enrolarse tripulaciones tituladas para estas misiones. Los viajes redondos de menos duración a lugares de la Galaxia podrían resultar incluso más atractivos. No sólo viajarían los tripulantes a un mundo distante, sino que en un futuro remoto regresarían a su propio mundo, lo cual sería una aventura y reto difícil de igualar.

≪ Es claro que las naves y motores que estamos ahora escasamente desarrollando para la exploración de nuestro sistema solar provincial, no son más que tenues sombras de las potentes astronaves necesarias para los vuelos interestelares relativistas. El problema principal es la construcción de una nave espacial capaz de transportar una carga útil sustancial a velocidades extremadamente altas durante un largo período de tiempo. Un sistema de propulsión basado en los sistemas contemporáneos con combustible llevado a bordo de la nave en el momento del despegue, requeriría una provisión fantástica, incluso aunque se lograra la conversión completa de la masa de combustible en energía y se pudiera aprovechar toda ésta para la propulsión. A velocidades relativistas y con el plan de vuelo anterior, la relación de masa de carga útil a masa total inicial de la nave tiene que ser, aproximadamente, $2/(1-\nu/c)$ siendo ν la velocidad máxima. Para llegar a M 31, la gran galaxia de Andrómeda, en el tiempo de vida de una tripulación humana haría falta que ν fuera igual a 0,99999 c. La masa inicial de este combustible ideal tendría que ser entonces 200000 veces mayor que la masa del resto de la nave. La conversión completa de la masa en energía sólo se obtendría si la mitad del combustible del cohete fuera antimateria, es decir, una forma de materia en la cual nuestros clásicos protones de carga positiva están sustituidos por antiprotones de carga negativa y en la que los convencionales electrones negativos se cambian por positrones de carga positiva. La antimateria no es corriente en la Tierra por una razón: Cuando se pone en contacto físico con la materia ordinaria, ambas se destruyen, en una conversión violenta e invisible de masa en energía, a menudo en forma de rayos gamma. Es precisamente esa destrucción la que habría que emplear para activar un motor espacial antimateria hipotético.

≪ El almacenamiento de la antimateria, por no citar su producción en las cantidades requeridas, es verdaderamente un problema serio. No quisiéramos que accidentalmente se pusiera en contacto con las paredes de la nave espacial, compuestas de materia ordinaria. ≫ Resulta sorprendente que se han adelantado ideas interesantes que podrían llevar a superar con éxito esta dificultad. Por ejemplo, quizá un tipo especial de botella magnética, no material, mediante un intenso campo magnético. Dichas botellas magnéticas se están investigando ahora respecto a experimentos sobre reacciones termonucleares controladas. ≪ Pero un vehículo espacial interestelar propulsado por antimateria y que requiera una relación de masa de 200000 no parece ser una solución muy buena del problema.

≪ Una salida de estas dificultades que aporta elegancia en su concepción es la que ha propuesto el físico americano Robert W. Bussard, de la TRW Corporation, Los Angeles, Bussard describe un reactor interestelar que usa átomos del medio interestelar tanto como fluido de trabajo (para proporcionar la masa de reacción), como fuente de energía (mediante la fusión termonuclear). La conversión completa de la materia en energía no existe. Tal reactor de fusión no es verdaderamente posible hoy día, aunque no viola ninguna ley física. Su construcción se está procurando activamente en búsqueda de las reacciones termonucleares controladas y no hay razón para creer que se tarde más de un siglo en lograrlo en este planeta.

≪ Un reactor interestelar así precisaría una superficie muy grande a fin de captar suficiente gas interestelar para propulsar la nave. Los cálculos de Bussard indican que si en el medio interestelar hubiera un átomo de hidrógeno por cm^3 la densidad de la superficie del reactor tendría que ser de 10^{-8} g cm^{-2}. En general, la superficie de toma del reactor es inversamente proporcional a la concentración n_H de gas interestelar. Si, por ejemplo, la masa del cohete fuera de 100 toneladas y n_H igual a 1 átomo por cm^3 la superficie de toma del reactor tendría que ser de 10^{15} cm^2, lo que corresponde a un radio de unos 700 km. ≫ En el espacio metagaláctico, donde $n_H \leqslant 10^{-5}$ átomos cm^{-3}, ese radio tendría que ser 100 veces mayor.

≪ Estas áreas de carga frontal parecen, evidentemente,enormemente grandes según los módulos contemporáneos y quizá persistan absurdamente grandes aun cuando proyectemos el progreso de tecnología futura. Pero tenemos que hacer hincapié en que las superficies colectoras no tienen que ser materiales. En laboratorio se están obteniendo ahora normalmente intensos campos magnéticos y también en aplicaciones comerciales, mediante el empleo de las llamadas bombas de flujos superconductores. Los campos magnéticos guían las partículas cargadas según trayectorias dadas y si las líneas de fuerza magnética están dispuestas con ingenio, por el proyecto de las bombas de flujo, se pueden llevar las partículas cargadas a cualquier región que se desee dentro del campo magnético. En consecuencia, parece al menos posible que la recolección de átomos del medio interestelar por naves estelares a reacción se puede lograr por ionización del medio a proa de la nave y guía de los iones a la superficie de toma por medio de intensos campos magnéticos. ≫

Si el reactor de Bussard se convierte en realidad, nuestros descendientes serán testigos de la reposición, en el contexto interestelar, de los principios de vuelo empleados por sus antepasados en los aviones a reacción. El medio circundante sería necesario para el vuelo.

≪ Queda todavía otra dificultad importante que hay que vencer antes de que pueda considerarse factible el vuelo espacial interestelar relativista. El reactor se traslada por el medio interestelar a una velocidad justo menor que la de la luz, lo que equivale, considerando parada la nave, a que los granos de polvo y los átomos del medio interestelar se precipitan contra ella a una velocidad casi igual a la de la luz.

≪ Con nuestro plan de vuelo descrito previamente, la velocidad del reactor sería

$$v = c\,[1 - (1 + aS/2c^2)^{-2}]^{\frac{1}{2}}$$

siendo S la distancia al destino y a la aceleración y desaceleración constante elegida. Si S se hace igual a 10000 parsecs - distancia al centro galáctico - - v diferiría de c tan sólo en una millonésima por ciento. A esta velocidad, cada átomo del medio interestelar que colisionara con el reactor aparecería como componente de los rayos cósmicos que tienen una energía de 10^{13} electronvolts. Con una densidad de 1 átomo de hidrógeno por cm^3 en el espacio interestelar, la nave se encuentra con 10^{13} electronvolts cm^{-3}. Puesto que la nave espacial se mueve casi a la velocidad de la luz, el flujo de radiación cósmica equivalente que choca contra la superficie de carga frontal del reactor sería de 10^{13} electronvolts $cm^{-3} \times (3 \times 10^{10}$ cm $s^{-1}) = 3 \times 10^{23}$ electronvolts cm^{-2} s^{-1}, o sea 2×10^{11} erg cm^{-2} s^{-1}. Es una radiación penetrante, con una intensidad 100000 veces superior a la de la luz solar en la superficie de la Tierra.

La tripulación se asustaría, incluso en vuelos a las estrellas más próximas, a menos que se tomaran cuidadosas precauciones.

≪ Resulta evidente de las grandes relaciones de masa ya necesarias para los vuelos interestelares "propulsados" (por ejemplo, empleando antimateria) y de las bajas densidades de superficie de carga frontal necesarias para un reactor interestelar, que quizá nunca sea una solución práctica un material que apantalle. Pero es posible que los mismos métodos de desviación magnética empleados para guiar las partículas interestelares al reactor termonuclear se puedan usar también para apartar las partículas de los compartimientos habitados y demás zonas vulnerables de la nave espacial. ≫

Estas dificultades parecen hoy colosales, pero hemos de tener presente que hace un siglo, la posibilidad de volar en un vehículo que fuera más pesado que el aire parecía muy remota ≪ o imposible. ≫ Y ahora en cambio, tenemos el avión que lo atestigua. La experiencia en el desarrollo de la ciencia y la tecnología nos enseña que si los requisitos básicos para una idea no contradicen los principios científicos conocidos, el problema se resuelve más tarde o más temprano. El ritmo del desarrollo científico y tecnológico parece que se acelera con el tiempo. Considerando todas las posibilidades para establecer contacto entre civilizaciones galácticas, no podemos excluir el directo mediante vuelos espaciales interestelares. ≪ Son dignas de mención las propias conclusiones a que llega Bussard sobre la magnitud del esfuerzo que supone el vuelo espacial interestelar relativista:

> . . . En cualquier aspecto, el vuelo interestelar supone ímplicitamente una grandiosa empresa, de magnitud mucho mayor en alcance y dificultad a la vez, que los viajes

> interplanetarios en el sistema solar. . . El esfuerzo de ingeniería necesario para alcanzar a corto plazo el éxito de los vuelos interestelares será probablemente mucho mayor que el que supone el vuelo interplanetario respecto a viajar por la superficie de la Tierra. Sin embargo, la expansión del horizonte humano será proporcionalmente mayor y nada que sea grandioso se ha alcanzado nunca fácilmente. ≫

33

Posibles consecuencias del contacto directo

¿Dónde están?

Enrico Fermi (1943)

. . . Si nos encontráramos con una criatura de forma muy distinta a la del hombre, con sabiduría y lenguaje, nos sorprendería y sobresaltaría su presencia. Pero si tratamos de imaginar o pintar una criatura como el hombre en todo lo demás, pero que tenga un cuello cuatro veces más largo y unos grandes ojos redondos cinco o seis veces mayores en tamaño y separación, no podemos considerarlo sin la máxima aversión, aunque al mismo tiempo no podamos explicarla. Y es que es un criterio ridículo que se ha formado el hombre, que sea imposible que pueda morar un alma racional en un cuerpo distinto al nuestro. . . Esto no es más que consecuencia de la flaqueza, ignorancia y prejuicios de los hombres.

Christiaan Huygens, *Nuevas conjeturas respecto a los mundos planetarios, sus habitantes y producciones* (1670)

≪ En el capítulo anterior decíamos que los vuelos espaciales interestelares tripulados, tanto a velocidades subrelativistas usando inhibidores metabólicos, como a velocidades relativistas con el reactor de Bussard, son posibles sin recurrir a principios todavía no descubiertos. Con un módico margen de confianza en el progreso científico y tecnológico dentro de los próximos primeros siglos, creo que el vuelo espacial interestelar a las regiones más lejanas de nuestra Galaxia es un objeto factible para el hombre. Si así es el caso, otras civilizaciones con siglos y siglos de avance sobre nosotros, tienen que estar ahora en continuos viajes entre los espacios estelares.

≪ Si el vuelo espacial interestelar es teóricamente factible, aun cuando desde nuestro punto de vista sea una empresa excesivamente cara y difícil, es posible que esté desarrollado por una civilización considerablemente más adelantada que la nuestra. Aun prescindiendo de los intercambios de información y de ideas con otras comunidades racionales. Las ventajas científicas del vuelo espacial interestelar son innumerables. Están las pruebas astronómicas directas de estrellas en todas las fases de evolución, de sistemas planetarios distantes, del medio interestelar, de cúmulos globulares muy antiguos. Están los riesgos astronómicos cooperantes, tales como las paralajes trigonométricas de objetos distantes en extremo; está la observación y muestreo de multitud de biologías, y sociedades independientes. Hay empresas que retarían e inspirarían incluso a civilizaciones de muchos años.

≪ Para las civilizaciones de vida L, previamente adoptadas, vemos que en principio, es posible el vuelo espacial interestelar a todos los puntos de la Galaxia e incluso a otras galaxias. Los viajeros regresarían en un futuro muy lejano a su salida, pero ya hemos anticipado que la civilización tenía que ser estable a lo largo de esos inmensos períodos de tiempo. Se llevarían los datos desde la partida, un depósito de la información recibida, y una comunidad interesada en unos resultados que no se pueden obtener de ningún otro modo. Para evitar la duplicación innecesaria de la exploración interestelar, las sociedades comunicativas formarían un fondo común de información y actuarían conjuntamente, como ya ha indicado Bracewell. Existirán los contactos directos y el intercambio de información y artefactos entre la mayoría de sociedades exploradoras del espacio que posean astronaves. En realidad, a grandes distancias, la comunicación por nave estelar será casi tan rápida - y mucho más segura - que la comunicación por radiación electromagnética. El caso tiene cierta semejanza al de las comunidades europeas exploradoras de ultramar y sus colonias, del posrenacimiento, antes de la entrada en servicio de los clippers y los barcos de vapor. Si el

vuelo espacial interestelar es factible, las civilizaciones técnicas de la Galaxia se intercomunicarán todas ellas, pero la comunicación será con lentitud.

≪ Es interesante estimar el tiempo medio entre contactos para un sistema planetario dado. Aunque los tiempos de tránsito a bordo de la nave a velocidades relativistas son más o menos los mismos a cualquier lugar de la Galaxia, el tiempo transcurrido en el planeta de origen es, evidentemente, aproximadamente proporcional a la distancia del viaje. El contacto interestelar empleando inhibidores metabólicos o bien velocidades relativistas, tendría su máxima frecuencia entre comunidades vecinas, aunque podemos anticipar que se intentarán los grandes viajes.

≪ Admitamos que cada uno de los N planetas en la fase comunicativa lanza q naves estelares cada año. Que cada uno de estos vehículos efectúa por lo menos un contacto por viaje y que la mayoría efectúan misiones a puntos que están de 10^3 a 10^4 años de sus respectivos orígenes. En estado uniforme hay pues q contactos por año efectuados por cada uno de los N planetas y como qN contactos por año en la Galaxia en conjunto. (Las unidades de tiempo son en este caso años terrestres.) Con respecto a la capacidad económica de tales civilizaciones avanzadas, no parece mucho una de $q = 1$ año^{-1}. Es claro que dando a q otros valores, se obtendrían otros resultados. En consecuencia, cada civilización hace aproximadamente un contacto por año y, en promedio, L contactos a lo largo de su vida. Supongamos, continuando la exposición del principio del capítulo 29, que $N = 10^6$ y $L = 10^7$ años. ≫ En mi opinión, estos cálculos de Sagan son demasiado optimistas. ≪ Entonces, cada civilización hace un promedio de 10^7 contactos durante su vida. El número de contactos por año para toda la Galaxia es de 10^6, una fracción algo grande de la que tendría que ser entre dos comunidades avanzadas. El número medio de naves estelares rondando de cada civilización técnica en cualquier momento es de $\sim 10^3$ a 10^4

≪ Si los contactos se hacen en base puramente casual, cada estrella se visitará una vez cada 10^5 años. Hasta las estrellas más masivas se examinarán entonces al menos una vez mientras estén en la serie principal. Sobre todo, con un depósito de información galáctico central, estas civilizaciones avanzadas tendrían una idea excelente de cuales son los ambientes planetarios más probables para el desarrollo de vida racional. Con una frecuencia promedio de contacto por planeta de 10^{-5} año^{-1}, se puede prever con resultado positivo el origen y evolución de la vida en cualquier planeta de la Galaxia. Se apreciaría el desarrollo sucesivo de metazoarios, de comportamiento cooperativo, del uso de instrumentos y de programas de comunicación intraespecífica y podría seguirse cada uno incrementando la frecuencia del muestreo interestelar. Si la fracción de planetas habitados en los que hay seres racionales es $f_i \sim 10^{-1}$, entonces, la frecuencia de contacto con comunidades planetarias racionales pretécnicas sería del orden de 10^{-4} año^{-1}. Una vez establecida una civilización técnica y especialmente, después de logrado el contacto interestelar - por radio, por ejemplo - aumentaría de nuevo la frecuencia de los contactos directos. Si la fracción de planetas habitados por seres racionales que están también en la fase comunicativa es $f_c \sim 10^{-1}$, la frecuencia de contacto con civilizaciones técnicas tendría que aumentar a unas 10^{-3} año^{-1}. Los planetas de interés extraordinario serían visitados aún con más frecuencia.

≪ Bajo las hipótesis anteriores, cada civilización técnica comunicativa sería visitada por otra semejante cada mil años. Los vehículos de inspección de cada civilización regresarían a su base de origen a razón de uno al año y una proporción grande de ellos habría tenido contacto con otras comunidades. La riqueza, diversidad y esplendor de este comercio, el intercambio de mercancías e información, de argumentos y artefactos, de conceptos y conflictos, tienen que espolear continuamente la curiosidad y encumbrar la vitalidad de las sociedades participantes.

≪ Si estas estimaciones son tan sólo aproximadamente correctas, podemos anticipar la colonización interestelar extensiva por civilizaciones técnicas de planetas previamente no habitados. En el capítulo 29 estimamos crudamente la probabilidad de que un planeta determinado apropiado para la vida, en realidad posea una civilización técnica, como $f_c f_i \sim 1$ por ciento. Así pues, lo que encontrarían con frecuencia las civilizaciones exploradoras del espacio, serían planetas habitables carentes de civilizaciones técnicas. No está claro cual sería su reacción. Podrían dejar solos a esos mundos y que evolucionaran sus propias únicas formas de vida por el inexorable cedazo de la selección natural. El contacto directo se puede demorar hasta que las formas de vida en un planeta desarrollen una sociedad técnica a su marcha. Quizá estén, en efecto, en algún *Codex Galáctica* las prohibiciones estrictas contra la colonización de planetas poblados, pero pretécnicos, aunque no estamos en condiciones de juzgar la ética extraterrestre. Quizá se está intentando colonizar todo planeta habitable prescindiendo de los habitantes indígenas, con fines de prestigio o explotación o por motivación no humana que ni siquiera podemos imaginar. Se puede suponer todo un espectro de casos intermedios, en los cuales se plantan pequeñas colonias en planetas pretécnicos, no para inferir o intervenir en el desarrollo evolutivo de las formas de vida locales, sino simplemente para observarlos. Téngase presente que si la colonización es la norma, entonces hasta una civilización exploradora se esparciría rápidamente, en un tiempo mucho más corto que la edad de la Galaxia por toda la Vía Láctea. Habría colonias de colonias de colonias, como pasaba en muchos lugares del Mediterráneo Occidental en la Edad Antigua.

≪ Pero entonces, todo planeta habitable tendría una civilización técnica y $f_c f_i$ sería igual a 1. Aplicando nuestro análisis del principio del capítulo 29, resultaría que el número de civilizaciones técnicas en la Galaxia en el momento actual sería $N = 10\ L$, siendo L la vida media por civilización. Si hiciéramos $L = 10^7$ años, habría 10^8 civilizaciones técnicas en la Galaxia o bien en planetas en órbita alrededor del 0,1 por ciento de las estrellas del firmamento. La distancia media entre civilizaciones técnicas sería entonces de decenas en lugar de cientos de años luz. En cambio, si tomamos para L

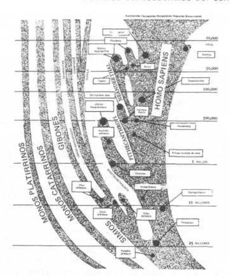


Figura 33-1. La evolución del hombre de acuerdo con un punto de vista cientffico reciente. (Adaptado con ligeras modificaciones de una ilustración de la obra de Jacquetta Hawkes y Sir Leonard Woolley, *Pre-History and the Beginnings of Civilitation*, Harper and Row, 1963.)

el valor de Von Hoerner, $L = 10^4$ años, la distancia media seguiría siendo de varios cientos de años luz.

≪ La exposición precedente tiene dos aplicaciones curiosas a nuestro propio planeta, una al pasado y otra al futuro. La figura 33-1 muestra una reconstrucción reciente del árbol ancestral del hombre contemporáneo, recopilado de concienzudos análisis paleontológicos, arqueológicos y antropológicos. Vemos que hace unos 25 millones de años existía una criatura llamada Proconsul que era probablemente ancestral al Homo Sapiens y al gran antropoide. El Proconsul estaba erguido, era bípedo y usaba herramientas. La evolución subsiguiente en la línea del hombre ha estado marcada, como lo están todas las sendas evolutivas, a tontas y a locas y sin salida. Vemos, por ejemplo, que la evolución del antiguo parantropus, el antiguo hombre de

Java y el antiguo hombre de Neanderthal representan todas las sendas sin salida. Fueron inteligentes, comunicativos y probablemente tuvieron sus culturas propias sencillas, pero no dejaron sucesión. Si las condiciones físicas hubieran sido ligeramente diferentes, hubieran ocurrido de otro modo los accidentes de la existencia diaria. El Homo Sapiens podría haber sido una evolución sin salida y quizá podría haber ahora en el planeta Tierra una civilización técnica de pitecántropos, o quizá no hubiera ninguna civilización.

≪ Pero estas cuestiones aunque difíciles para nosotros reconstruirlas a una distancia de millones de años, habrían sido mucho más claras para una civilización técnica bastante más avanzada que la actual de la Tierra, que nos hubiera visitado cada unos cien mil años para ver que había sucedido de interés en ese tiempo. Hace unos 25 millones de años, una nave galáctica de reconocimiento, en visita de rutina al tercer planeta de una enana *G* relativamente vulgar, pudo haber observado un desarrollo en evolución interesante y prometedor: el Proconsul. La información podría haberse filtrado a la velocidad de la luz lentamente por la Galaxia y haberse tomado nota de ella en algún depósito de información central, quizá en el centro galáctico. Si la aparición de vida racional en un planeta es de interés científico general o de otra suerte para las civilizaciones galácticas, es lógico que la aparición del Proconsul hubiera hecho aumentar la frecuencia de la observación de nuestro planeta, quizá como a una vez cada diez mil años. Al principio de la última época posglacial, el desarrollo de la estructura social, del arte, la religión y las habilidades técnicas elementales deberían haber incrementado aún más la frecuencia de los contactos. Y si el intervalo de las inspecciones es sólo de varios miles de años, existe entonces la posibilidad de que el contacto con una civilización extraterrestre haya tenido lugar dentro de los tiempos históricos.

≪ No hay datos fidedignos de contacto directo con una civilización extraterrestre en los últimos siglos, cuando se han difundido bien los eruditos ecuánimes y los razonamientos no supersticiosos. (Véase el capítulo 2.) Cualquier leyenda de contacto anterior viene gravada con cierto grado de embellecimiento lleno de fantasía, debido simplemente a los puntos de vista que prevalecían en la época del contacto. La magnitud con que las tergiversaciones y adornos posteriores alteran la trama fundamental del acontecimiento, varía con el tiempo y las circunstancias. Por ejemplo, el libro de M. Eliade *Cosmos and History* menciona un caso del folklore rumano, registrado por C. Brailoiu, en el que, solamente 40 años después de una verdadera tragedia romántica, la historia real estaba plenamente embellecida con temas mitológicos y seres sobrenaturales. Cuando ya se cantaba la balada y se le atribuía una antigüedad remota, todavía vivía la verdadera heroína.

≪ Otro incidente todavía más significativo del asunto que tratamos, es la narración nativa del primer contacto de la gente de Tlingit del nordeste de la costa de Norteamérica, con la civilización europea - con la expedición al mando del navegante francés La Perouse en 1786. Los Tlingit no conservaron documentos escritos y, un siglo más tarde, la narración verbal del

encuentro se la relató al antropólogo americano G. ". Emmons un jefe de los Tlingit. El cuento estaba recargado con una estructura mitológica en la cual se interpretaban los barcos de vela franceses. Pero lo más chocante es que la verdadera naturaleza del encuentro se había preservado con toda fidelidad. Un antiguo guerrero ciego había dominado sus temores en el momento del encuentro, subido a bordo de uno de los barcos franceses e intercambiado artículos con los europeos. A pesar de su ceguera, dedujo que los ocupantes de los barcos eran hombres. Su interpretación llevó a un comercio activo entre la expedición de La Perouse y los Tlingit. La tradición oral contenía información suficiente para la reconstrucción posterior de la verdadera naturaleza del encuentro, aunque muchos de los incidentes estaban desfigurados en un fondo mitológico. Por ejemplo, los barcos de vela se describían como inmensos pájaros negros con las alas blancas. ≫

Como un ejemplo más, los pueblos de Africa al sur del Sahara, que no tenían lenguaje escrito hasta el período colonial, conservaron su historia principalmente por el folklore. Esas leyendas y mitos transmitidos por personas analfabetas de generación en generación, son en general de gran valor histórico.

≪ El encuentro entre La Perouse y los Tlingit sugiere que en determinadas circunstancias, un breve contacto con una civilización ajena quedaría registrado de modo reconstruible. La reconstrucción se facilitaría mucho si (1) el acontecimiento se guarda por escrito poco después de suceder; (2) se efectúa un cambio importante en la sociedad que ha hecho el contacto, como consecuencia del encuentro y (3) la civilización que hace el contacto no procura desfigurar su naturaleza exógena.

≪ Por otra parte, es evidente que la reconstrucción de un contacto con una civilización extraterrestre está cuajada de dificultades. ¿Qué apariencia podemos suponer tendría el mito del contacto? La simple cuenta de la aparición de un ser extraño que realiza obras maravillosas y que reside en los cielos no es lo bastante adecuada. Todos los pueblos necesitan conocer su medio ambiente y la atribución a deidades no humanas de aquello que no comprenden del todo es al menos una forma de conformarse. Cuando tiene lugar la interacción entre pueblos que creen en deidades diferentes, es inevitable que cada uno atribuya fuerzas extraordinarias a su dios. La residencia de los dioses en el cielo no es ni siquiera aproximadamente sugestiva de origen extraterrestre. Después de todo ¿dónde pueden habitar los dioses? Es evidente que no en el país de al lado, pues con ir a él se desmentiría su existencia. Se desarrollan hasta las más sutiles percepciones metafísicas. Posiblemente, por desesperación, los dioses sólo pueden vivir debajo de la tierra, en los mares o en el cielo. Excepto quizá para los navegantes, el cielo ofrece la más amplia gama de oportunidades para la especulación teológica.

≪ En consecuencia necesitamos más leyenda que la aparición de un ser extraño que hace obras maravillosas y que vive en el cielo. Ciertamente aportaría credibilidad si no se añadieran a la historia claros presagios sobrenaturales. La descripción de la morfología de algo no humano inteligente, la

exposición clara de las realidades astronómicas que un pueblo primitivo no podía adquirir por sus propios medios o una presentación transparente del propósito del contacto, aumentaría la credibilidad de la leyenda. ≫

Tal suceso insólito sería en verdad descrito en las leyendas y mitos de los pueblos que estuvieran en contacto con viajeros del espacio. Los astronautas serían probablemente pintados como si tuvieran propiedades deíficas y fuerzas sobrenaturales. Se harían resaltar sus llegadas del cielo y sus posteriores regresos al mismo. Estos seres pueden haber enseñado a los habitantes de la Tierra artes útiles y ciencias básicas, que también se reflejarían en sus leyendas y mitos.



Figura 33-2. Fresco de Tassili de los Ajjer en el Sahara central. Algunos de estos frescos datan del año 6000 a. J.C. El arqueólogo francés Henri Lhote llamó a esta figura Jabbaren, "el gran dios marciano" aunque, desde luego, no hay ninguna prueba que sugiera el origen extraterrestre del prototipo de esta ilustración. (Reproducido con permiso de Henri Lhote, de *The Search for the Tassili Frescoes*, E. P. Dutton and Co., Nueva York.)

leyenda en la forma que se dispone hoy. La forma de presentación es tan chocante como el contenido. Las traducciones citadas del griego y del latín están tomadas de *Ancient Fragments*, de Cory, de la edición revisada de 1876:

La narración de Alejandro Polyhístor:

Beroso, en su libro primero sobre la historia de Babilonia, nos informa que vivió en la época de Alejandro, el hijo de Filipo y cita que se conservaban con el mayor cuidado en Babilonia documentos escritos, que abarcaban un período de quince miriadas de años. Estos escritos contenían la historia de los cielos y del mar; del nacimiento de la humanidad; también la de aquellos que tenían regla soberana y de las acciones alcanzadas por ellos.

Y, en primer lugar, describe a Babilonia como un país situado entre el Tigris y el Eufrates. Menciona que abundaba en él el trigo, la cebada, el ocrus y el sésamo y en los lagos se encontraban las raíces llamadas gongae, que eran buenas para comerlas y eran, respecto a nutrición, como la cebada. También había palmeras y manzanos y muchas clases de frutas; peces y también aves; tanto de paso como acuáticas. La parte de Babilonia que limitaba con Arabia era árida y no tenía agua pero la que daba al otro lado, tenía colinas y era fructífera. En Babilonia había (en aquellos tiempos) gran variedad de personas de distintas naciones, que habitaban Caldea y vivían sin orden ni concierto, como las bestias del campo.

En el primer año hizo su aparición, de la parte del Golfo Pérsico que bordea a Babilonia, un animal dotado de razón, que se llamaba Oannes. (De acuerdo con la narración de Apollodoros.) Todo el cuerpo del animal era como el de un pez, y tenía debajo de una cabeza de pez otra cabeza y también pies abajo, como los de hombre, subunidos a la cola de pez. Su voz y también su lenguaje, era articulado y humano; y su representación se conserva incluso hoy. (Véase la figura 33-4.)

Este ser, durante el día solía conversar con los hombres; pero no tomaba ningún alimento en ese tiempo y les ensenaba letras y ciencias y toda clase de artes. Les enseñó a construir casas, a fundar templos, a recopilar leyes y les explicó los principios de la geometría. Les enseñó a distinguir las semillas de la tierra y a recoger los frutos. En poco tiempo les instruyó en todo cuanto pudiera tender a suavizar los modales y humanizar al hombre. Desde aquel entonces, tan universales fueron sus enseñanzas, que nada se ha añadido para mejorarlas. Cuando se ponía el sol, este ser tenía la costumbre de sumergirse de nuevo en el mar y permanecía toda la noche en su profundidad, pues era anfibio.

Después de este, aparecieron otros animales, como Oannes, de los cuales Beroso promete dar cuenta cuando llegue a la historia de los reyes. Además Beroso escribió sobre la generación de la humanidad, de sus diferentes formas de vida y de su forma de gobierno.

La narración de Abydenus:

Cuanto concierne a la sabiduría de los caldeos.

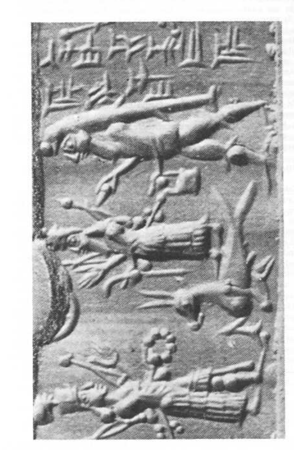


Figura 33-4. Representación de Oannes en un sello cilíndrico asirio del siglo IX a. J. C. Este sello estaba antes de la Guerra Mundial, en el departamento de Asia antigua del Museo de la Ciudad, de Berlín. (Reproducido de *Cylinder Seals*, de H. Frankfort, MacMillan, Londres, 1939.)

guas y parece ahora posible que el desarrollo de la civilización mesopotámica fue mucho más gradual que lo que suponía Jacobsen.

≤ Finalmente, cabe mencionar algunos conceptos pertinentes a la mitología sumeria. Los dioses se caracterizan por una variedad de formas; no todas humanas. Son de origen celestial. En general, cada uno está asociado a una estrella diferente. En realidad, en las representaciones pictográficas más antiguas, que precedieron a la escritura cuneiforme, son idénticos los símbolos para el dios y para la estrella. El cosmos está concebido como un estado gobernado por una asamblea de dioses aparentemente representativos y democráticos, que deciden los hados de todos los seres. Dentro de la asamblea había un grupo menor de deidades prominentes llamado "Los siete dioses que determinan los destinos". Esta descripción no es un conjunto muy diferente a lo que podríamos esperar si una red de civilizaciones confederadas entrelazara la Galaxia.

≤ Algunas de las ideas astronómicas y de otra índole de las civilizaciones sumerias y sucesoras están representadas en sellos cilíndricos - cilindros pequeños que al arrollarlos con arcilla u otro material plástico, dejan en él el negativo de su impresión. Por desgracia, las notaciones cuneiformes en cada sello cilíndrico están sólo en raras ocasiones relacionadas con el contenido pictórico del sello. Lo más corriente es que la inscripción cuneiforme diga algo así como el equivalente sumerio de "Juan Rodríguez: Su sello" Es por esta razón que, por lo general, han fracasado los intentos para comprenderlos con detalle. Se refieren a temas mitológicos que por lo demás están perdidos.









≤ En la figura 33-5 vemos las reproducciones de cuatro de esos sellos cilíndricos que se encuentran ahora en distintos museos. En cada uno de ellos aparece una clara representación de algún objeto celeste: un círculo central, o una esfera, rodeado por otros círculos o esferas menores. En la superior izquierda vemos que el círculo central está rodeado por rayos y que se puede identificar claramente como un sol o una estrella. ¿Y qué hacemos con los otros objetos que rodean a cada estrella? La suposición natural es que representan a los planetas. Pero la idea de planetas dando vueltas a soles y estrellas es original, en esencia, de Copérnico. No obstante, en la Grecia antigua se citan algunas especulaciones sobre esas líneas.

≤ En el sello cilíndrico superior izquierdo de la figura 33-5, es de lo más curioso que aparecen *nueve* planetas circundando el sol prominente del cielo (y dos planetas pequeños aparte, a un lado). Las otras representaciones de los sistemas planetarios, si es que así los podemos llamar, muestran notablemente variación en el número de planetas por estrella. En algunos de los sellos cilíndricos, parece que la estrella y los planetas acompañantes están asociados a una deidad particular. En la figura 33-6 puede verse un sello cilíndrico todavía más enigmático.

≤ Estos sellos cilíndricos quizá no sean más que los experimentos del pensamiento inconsciente antiguo para entender y representar a un entorno a veces incomprensible y a veces hostil. Los cuentos del Apkallu pueden haberse hecho en su totalidad en paño, quizá ya en la época babilónica; quizá por el propio Beroso. La sociedad sumeria puede haberse desarrollado gradual-

---

Figura 33-5. Arriba a la izquierda: Sello cilíndrico accadio que representa al dios de la fertilidad con arado. Este sello estaba antes de la Guerra Mundial en el departamento de Asia antigua del Museo de la Ciudad, de Berlín. Arriba, a la derecha: Sello cilíndrico mitanni del Museo Británico, que muestra - entre otros objetos interesantes - los que se han descrito convencionalmente como un cazador y un bebedor. Abajo, a la izquierda: un sello cilíndrico casita en el que se ve la influencia del estilo mitanni. Este sello está en el Louvre. Abajo, a la derecha: Sello cilíndrico del primer imperio babilónico, descrito convencionalmente como "Marduk y el héroe con el jarrón que mana". Este sello estaba antes de la Guerra Mundial en el departamento de Asia antigua en el Museo de la Ciudad, de Berlín. (Reproducido de *Sellos cilíndricos*, de H. Frankfort, MacMillan, Londres, 1939.)



Figura 33-6. Sello cilíndrico asirio del siglo IX a. J. C. A la izquierda, un hombre escorpión y un disco solar con alas; ambos, símbolos convencionales de Mesopotamia. El ávido animal de la escena central con el pesado aparato sobre el lomo se describe convencionalmente como un dragón. Obsérvese la representación del delfín justo delante de él. Este sello estaba antes de la Guerra Mundial en el departamento de *Asia antigua* del Museo de la Ciudad de Berlín. (Reproducido de *Cylinder Seals*, de H. Frankfort, MacMillan, Londres, 1939.)

mente a lo largo de muchos miles de años. En cualquiera de los casos, la demostración convincente completa de un contacto en el pasado con una civilización extraterrestre será siempre difícil basada sólo en fundamentos textuales. Pero los cuentos como la leyenda de Oannes y especialmente las representaciones de las más primitivas civilizaciones de la Tierra, merecen mucha más atención que la dedicada hasta ahora para ver la posibilidad de contacto directo con una civilización extraterrestre entre sus múltiples posibles interpretaciones.

≪ Existen también otras fuentes posibles de información. Con los números, hemos visto que es posible que la Tierra haya sido visitada muchas veces por varias civilizaciones galácticas (posiblemente $\sim 10^4$ en el tiempo geológico). No está fuera de duda que existan todavía artefactos de esas visitas, aunque hasta la fecha no se haya encontrado ninguno, o incluso que dentro del sistema solar se mantenga alguna especie de base para proporcionar la continuidad a expediciones sucesivas. A causa de la meteorización y del posible descubrimiento y obstáculo por los habitantes de la Tierra, les pudo parecer preferible no erigir esa base en la superficie de la Tierra. La Luna parece un lugar posible para el emplazamiento de una base, pero hasta la fecha, no se ha podido hallar. ≫ Agrest, por su cuenta, llega a una hipótesis semejante ≪ a la del escritor científico anglo-ceilandés Arthur C. Clarke. ≫ Los visitantes cósmicos podrían haber razonado que para cuando los hombres hayan desarrollado la tecnología para explorar la cara oculta de la Luna, podrían también haber alcanzado un cierto grado limitado de avance y se les podría llamar civilizados. ≪ El contacto con esa base proporcionaría evidentemente la mejor prueba directa de los posibles vuelos espaciales interestelares relativamente frecuentes.

≪ El ritmo de avance técnico de nuestra civilización es muy grande. Es posible que una sociedad extraterrestre o federación de esas sociedades quisiera hacer contacto lo antes posible con una civilización que emerge, para detener una aniquilación nuclear - consecuencia posible del intenso avance tecnológico - o quizá por otras razones. Una visita cada unos cuantos miles de años no sería de frecuencia suficiente para tal propósito. Drake y Clarke suponen que una civilización extraterrestre avanzada podría depositar un monitor de tecnología automática, una alarma que balizara el espacio interestelar y avisara cuando el nivel local de avance tecnológico alcanzara cierto valor. Por ejemplo, ese monitor podría analizar el contenido en la atmósfera de elementos radioactivos. Un incremento sustancial de radioisótopos atmosféricos tal como ha ocurrido en las últimas décadas debido a las pruebas nucleares haría que se disparara la alarma. Otra posibilidad es un agente residente extraterrestre. Si tal alarma existe, aunque no es más que una mera suposición, es probable que ya se haya disparado y que el mensaje esté volando por el espacio interestelar a la velocidad de la luz hacia la civilización técnica avanzada más cercana. Pero si las civilizaciones están separadas por varios cientos de años luz, tenemos que esperar hasta el año 2300 ó 2400 para tener la respuesta.

≪ Sin embargo, puede haberse considerado no necesario colocar tal monitor en una sociedad en desarrollo. Involuntariamente pronto indica su exitencia una civilización técnica. En el capítulo 27 describimos la posibilidad de captar una radiocomunicación destinada al servicio local de un planeta. A unos 40 ó 50 años luz de la Tierra, en estos momentos, se está propagando un frente de ondas debido al primer desarrollo masivo de la radiodifusión comercial en nuestro planeta. Dentro de unos cientos de años, podrá alcanzar la avanzada más próxima de la comunidad de civilizaciones galácticas y transcurrirán unos cuantos siglos más antes de que cualquier respuesta, amistosa u hostil, pueda percibirse en la Tierra.

≪ En la exposición sobre radiocomunicación interestelar del capítulo 27, dijimos que el contacto no se alcanzaría nunca si todas las civilizaciones avanzadas estuvieran escuchando y ninguna transmitiera señales. Algunos han sugerido que de momento deberíamos escuchar asiduamente, pero conteniéndonos cautelosamente de transmitir, porque no sabemos las intenciones de una sociedad galáctica superior. Este argumento merece estudiarse de cerca. ¿Qué podría querer de nosotros una civilización extraterrestre avanzada? Se pueden descartar casi todas las pesadillas convencionales. No serviríamos como esclavos, porque una sociedad capaz de dominar el espacio interestelar tendría sirvientes mecánicos adecuados. No nos necesitarían como alimento, ni aun cuando los seres humanos estuviéramos compuestos de proteínas especialmente sabrosas. Tal sociedad sería capaz de sintetizarlas en cualquier cantidad necesaria a partir de los aminoácidos constituyentes, tras el análisis de una simple muestra.

≪ Existen otras posibilidades que no se pueden descartar tan fácilmente. Una de las motivaciones principales para la exploración del Nuevo Mundo fue convertir al cristianismo a sus habitantes - pacíficamente, si era posible; a la fuerza cuando era necesario. ¿Podemos excluir la posibilidad de un evangelismo extraterrestre? Aunque los indios de América no servían para ninguna función concreta en las cortes de España y de Francia, no por eso dejaban de llevárselos por simple prestigio. ¿Es ésta una ambición que desconocen las civilizaciones extraterrestres? O quizá los seres humanos tenemos un talento poco común del cual no nos hemos percatado del todo. J. B. S. Haldane me dijo una vez que los delfines y las focas tienen una habilidad especial para aguantar una pelota de goma en la punta de la nariz y que esto es parte de la razón por la cual los tenemos en cautiverio. Sin embargo, esa habilidad no tiene ninguna utilidad para la foca en estado libre. Aunque cualquier organismo o artefacto de la Tierra pudiera duplicarse por una sociedad extraterrestre avanzada, el original y la copia seguirían siendo distintos. La psicóloga americana Ruth Ellen Galper ha indicado a este respecto que nosotros distinguimos cuidadosamente entre las perlas naturales y las cultivadas. ¿Podemos, finalmente, excluir motivos aún más oscuros? ¿Podría una sociedad extraterrestre querer estar sola en la cumbre del poder galáctico y hacer cualquier esfuerzo para aplastar a todo rival en potencia? ¿O podría incluso ser la "respuesta de la cucaracha" - el suprimir a toda criatura extraña sencillamente por ser distinta, como se sugiere en la última escena de *Metamorfosis*, de Franz Kafka?

≪ Puede que estas horripilantes posibilidades sean reales. O el hecho de que nos las podemos imaginar puede ser en sí solamente una reflexión de cuanto nos queda por andar antes de que estemos en condiciones de tener derecho a ser miembros de una comunidad galáctica de sociedades. Pero en cualquier caso, no hay camino de vuelta. No hay razón para mantener un silencio radiointerestelar, pues la señal ya se envió. A cincuenta años luz de la Tierra se encuentran volando entre las estrellas las noticias de una nueva civilización técnica. Si allá afuera hay seres explorando sus cielos en búsqueda de las noticias de una nueva civilización técnica, tendrán conocimiento de ella para bien o para mal. Si el vuelo espacial interestelar por civilizaciones técnicas avanzadas es un lugar común, podemos esperar un emisario, quizá en los próximos centenares de años. Tenemos la esperanza de que para entonces seguirá existiendo una civilización terrestre próspera para recibir a los visitantes de las estrellas remotas. ≫

humanos, aproximadamente 10^4 más habitantes que los que actualmente hay en la Tierra.

Aunque para sus contemporáneos las atrevidas ideas de Tsiolkovskii les parecieron simplemente las quimeras de un maestro de escuela provinciano, hoy día se aprecia su brillante previsión. El eminente físico teórico americano Freeman J. Dyson, del Instituto de Estudios superiores, de Princeton, basando sus teorías en los logros de la ciencia contemporánea, ha repetido recientemente y con independencia, muchas de las ideas de Tsiolkovskii, sin tener ningún conocimiento de la obra de este.

Dyson, en un artículo de lo más interesante, aparecido en 1960, intentaba realizar un análisis cuantitativo del problema de reconstrucción del sistema solar. Trataba primero el hecho de que el desarrollo científico y tecnológico tiene lugar con mucha rapidez una vez que la sociedad entra en la fase tecnológica. La escala de tiempo de esa evolución es insignificante comparada con la del tiempo astronómico y la del geológico. Dyson llegaba a la conclusión de que un factor importante que restringe el desarrollo científico y técnico de una sociedad racional, es el suministro limitado de los recursos de materia y energía. En la actualidad, las fuentes de materiales que puede explotar el hombre están limitadas, más o menos, a la biosfera de la Tierra, cuya masa se estima « con amplio margen, entre 5×10^{17} y 5×10^{19} g », es decir, menos que 10^{-8} la masa de la Tierra. La energía necesaria por año por la humanidad contemporánea es aproximadamente igual a la que se libera en la combustión de 1 a 2 mil millones de toneladas de buena antracita. En función del calor, hallamos que el hombre contemporáneo consume un promedio de 3×10^{19} erg s^{-1}. Los recursos de la Tierra en carbón, petróleo y otros combustibles fósiles se agotarán en pocos siglos.

La cuestión de nuestras reservas de materias y energía se hace más crítica cuando consideramos el futuro desarrollo a largo plazo de la sociedad. Incluso si suponemos que la tasa promedio de crecimiento anual de la producción sea un tercio por ciento (cifra muy pequeña cuando se compara con la tasa de crecimiento anual « de cierto porcentaje en las ciudades industriales modernas »), nuestra productividad se duplicará en cosa de un siglo. En 1000 años, el ritmo de fabricación aumentará 20000 veces y, en 2500 años, 10000 millones de veces. Esto quiere decir que las necesidades de energía dentro de 2500 años serán de 3×10^{29} erg s^{-1} o lo que es lo mismo, aproximadamente, el 0,01 por ciento de la luminosidad total del Sol. Esta cifra se acerca a las proporciones cósmicas. ¿Se habrán agotado del todo nuestras fuentes de energía cuando se alcance ese nivel de productividad?

Para responder a esta cuestión, consideremos los recursos de materiales que cabe imaginar sean accesibles a la humanidad del futuro. Supondremos — quizá con optimismo — que podremos controlar las reacciones termonucleares. La cantidad total de hidrógeno en la hidrosfera de la Tierra es aproximadamente de 3×10^{23} gramos, mientras que la de deuterio es de unos 5×10^{19} gramos. El deuterio sería el combustible básico de un reactor termonuclear. La cantidad de energía liberada por la reacción de todo el deuterio

disponible sería de unos 5×10^{38} erg. Dentro de 2500 años, esta cantidad de energía — suponiendo igualmente un aumento en la producción de un tercio por ciento por año — sería sólo suficiente para un período de 50 años. Aunque supongamos que la fusión termonuclear controlada se pueda llegar a alimentar con hidrógeno normal y que se pudiera utilizar como fuente de energía el 10 por ciento de los océanos del mundo — quemar más no sería conveniente — dentro de 2500 años podríamos proporcionar energía suficiente sólo para unos pocos miles de años más.

Otra posible fuente de energía sería la utilización directa de la radiación solar. Cada segundo, caen sobre la superficie de la Tierra, aproximadamente, 2×10^{24} erg de radiación solar. Esto es casi 100000 veces más que la producción actual de todas las formas de energía y, sin embargo, 100000 veces menos que la cifra necesaria calculada para el año 4500 de nuestra era. En consecuencia, la radiación solar directa no es adecuada para soportar un aumento uniforme y sostenido en la producción de tan sólo un tercio por ciento por año durante mucho tiempo. De esta exposición llegamos a la conclusión de que las fuentes de energía de la Tierra son insuficientes para satisfacer las necesidades a largo plazo de una sociedad tecnológica en desarrollo.

Antes de seguir considerando esta cuestión, abramos un paréntesis. Un lector supercrítico puede denunciar que los cálculos anteriores son semejantes a los razonamientos del cura inglés Thomas Malthus. Sin embargo, éste no es el caso. Malthus predijo que el crecimiento de la población del mundo dejaría atrás el desarrollo de las fuerzas productivas y que esto conduciría al deterioro progresivo de las condiciones de vida. La solución que propuso fue que las clases más humildes — es decir, las de trabajadores — tuvieran menos hijos. Los puntos de vista de Malthus carecen de valor, porque en una sociedad racional y organizada el aumento de las fuerzas productivas es siempre superior al aumento de población. La población de una nación está relacionada, a veces de modo complejo, con su productividad y, en realidad ésta es la que en definitiva la determina. Nuestro comentario sobre las cantidades futuras de energía no guarda relación con la doctrina de Malthus. Sólo hemos hablado de las posibilidades de aumentar la capacidad productiva de una sociedad, la cual está naturalmente limitada por las fuentes de energía y de materia de que disponga.

« En la figura 34-1 se indica esquemáticamente el aumento exponencial de la población de la Tierra durante los tiempos pasados. La capacidad productiva futura necesaria de nuestra sociedad se ve dramáticamente — suponiendo que no suceda una autolimitación importante de la población — extrapolando la curva hacia el futuro. »

Hagámonos otra pregunta: *¿Ocurrirá* de verdad un aumento apreciable de la capacidad productiva futura de nuestra sociedad? ¿Cuál es el fundamento para suponer que el progreso de la humanidad estará en relación directa con el aumento de la capacidad productiva? Quizá el desarrollo será en términos cualitativos, no cuantitativos. Estos problemas son de naturaleza filosófica y no se pueden discutir aquí con minuciosidad. Sin embargo, quisiera hacer

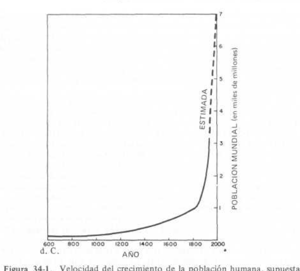


Figura 34-1. Velocidad del crecimiento de la población humana, supuesta en el pasado y extrapolada al futuro, en el planeta Tierra.

constar que a mí me parece imposible que se desarrolle una sociedad sin el consiguiente aumento de producción, tanto cualitativo como cuantitativo. Si se eliminara el aumento de la productividad, la sociedad acabaría falleciendo. Téngase presente que si una sociedad tuviera que interrumpir a sabiendas su desarrollo productivo, tendría que mantener un nivel de producción muy preciso. El más ligero descenso progresivo reduciría al cabo de miles de años el potencial tecnológico prácticamente a la nulidad. Durante esas escalas de tiempo, cualquier civilización que conscientemente decidiera mantener un nivel constante de productividad estaría en equilibrio en el filo de un cuchillo.

Volvamos ahora al tema de los recursos de materiales disponibles para una sociedad en desarrollo. Una vez logrado un estado alto de desarrollo técnico, parecería muy natural que una civilización se esforzara en aprovechar la energía y los materiales externos al planeta de origen, aunque dentro de los límites del sistema solar local. Nuestra estrella radia 4×10^{33} erg de energía cada segundo y las masas de los planetas joviales constituyen la fuente potencial principal de material. Júpiter por sí solo tiene una masa de 2×10^{30} gramos. Se calcula que haría falta una energía como de 10^{44} erg para vaporizar completamente a Júpiter, lo cual es aproximadamente igual al total de radiación emitida por el Sol en un período de 800 años.

Según Dyson, la masa de Júpiter se podría utilizar para construir una inmensa esfera hueca que contuviera al Sol y cuyo radio fuera, aproximadamente, 1 u. a. (150 millones de kilómetros). ≪ ¿Cuál sería el espesor de pared de una esfera de Dyson? El volumen de una esfera así sería $4\pi r^2 S$ siendo r el radio de la esfera, 1 u. a., y S su espesor. La masa de la esfera es precisamente su volumen por la densidad ρ y la masa disponible es aproximadamente la masa de Júpiter. Así pues, $4\pi r^2 S = 2 \times 10^{30}$ gramos. En consecuencia, hallamos que $\rho S \sim 200$ g cm^{-2}≫ de superficie serían suficientes para hacer habitable el interior de la esfera. Recordemos que la masa de la atmósfera encima de cada centímetro cuadrado de la superficie de la Tierra está muy próxima a los 1000 gramos. ≪ Si la densidad general de la esfera fuera de 1 g cm^{-3} o un poco menos, el espesor de su superficie S sería de unos pocos metros. ≫ El hombre hoy, para todos los fines prácticos, es un ser bidimensional puesto que sólo utiliza la superficie de la Tierra. Sería del todo posible para la humanidad del futuro — digamos de 2500 a 3000 años — crear una biosfera artificial en la superficie interior de una esfera de Dyson. Una vez que el hombre alcanzara este logro magno, sería capaz de aprovechar el total de la energía que desprende el Sol. ≪ Todo fotón emitido por el Sol sería absorbido por la esfera de Dyson y podría utilizarse productivamente. ≫ El área de la superficie interior de la esfera de Dyson sería aproximadamente mil millones de veces mayor que la superficie de la Tierra y podría soportar una población lo suficientemente grande para satisfacer las predicciones que hizo Tsiolkovskii hace tres cuartos de siglo.

No vamos a entrar en detalles de cómo podría construirse una esfera así, de cómo giraría, ni de cómo se tendría la seguridad de que sus habitantes no se precipitarían contra el Sol. Lo cierto es que la esfera tendría unas propiedades gravitatorias distintas a las de un cuerpo sólido. Estos problemas, aunque complejos, no son los principales. El propio Dyson prestaba atención especial a una circunstancia interesante: la de muchos parámetros completamente independientes, la masa de Júpiter, el espesor de una biosfera artificial, la energía total de la radiación solar y el período de desarrollo tecnológico, todos, según palabras de Dyson:

> . . . tienen órdenes concordantes de magnitud. . . Parece pues lógico suponer que salvo accidentes, las presiones maltusianas llevarían al final a una especie racional a adoptar tal explotación eficaz de los recursos a su alcance. Cabría esperar que dentro de unos cuantos miles de años de su entrada en el escenario del desarrollo industrial, cualquier especie inteligente se hallaría ocupando una biosfera artificial que rodearía completamente a su estrella principal.

Hasta aquí, las especulaciones de Dyson son en esencia las mismas que las de Tsiolkovskii, aunque basadas en conocimientos científicos más recien-

tes. A este respecto, Dyson introduce una idea nueva ≪ hasta para Tsiolkovskii ≫. ¿Cómo se vería desde fuera una civilización que viviera en la superficie interior de una esfera que encerrara a su estrella? Dyson dice:

Si se acepta el argumento anterior, la búsqueda de vida racional extraterrestre no se confinaría a la vecindad de las estrellas visibles. El hábitat más probable para esos seres sería un objeto oscuro de tamaño comparable a la órbita de la Tierra y con una temperatura en la superficie de 200 a 300 K. Tal objeto oscuro podría radiar tan copiosamente como la estrella que esconde en su interior, pero la radiación sería en el infrarrojo lejano, a longitud de onda de unos 10 μ.

Si así no fuera el caso, entonces la radiación producida por la estrella dentro de la esfera se acumularía y produciría temperaturas altas catastróficas.

Dado que una civilización extraplanetaria encerrada en una esfera de Dyson, sería una fuente muy poderosa de radiación infrarroja y puesto que la atmósfera de la Tierra es transparente a las radiaciones entre 8 y 13 μ, se podrían buscar esas estrellas infrarrojas con los telescopios existentes en la superficie de la Tierra. ≪ La sensibilidad de los detectores contemporáneos de infrarrojos es tal, que mediante telescopios grandes se podrían detectar, incluso hoy, las esferas de Dyson a distancias de cientos de años luz. Sin embargo, no hay ninguna manera de distinguir una esfera de Dyson detectada entre 8 y 13 μ de un objeto natural como una protoestrella contrayéndose hacia la serie principal y que emita radiación infrarroja con la misma intensidad. Si se levantara un planisferio del infrarrojo para las posibles esferas de Dyson, tendría que investigarse cada fuente de radiación por otros métodos para la radiación característica de una especie racional, por ejemplo, a la radiofrecuencia de los 21 cm. ≫

También es posible que las civilizaciones de Dyson se pudieran descubrir por los métodos ópticos existentes.

Se podría ver tal radiación el la proximidad de una estrella visible, bajo cualquiera de estas dos condiciones: que una raza de seres racionales no fuera capaz de explotar completamente la energía radiada por su estrella debido a insuficiencia de materia accesible, o que pudiera vivir en una biosfera artificial que rodeara a una estrella de un sistema múltiple del cual una o más de las estrellas componentes no se pudieran explotar y siguieran siendo visibles para nosotros. Es imposible imaginar la probabilidad de que una de estas circunstancias pudiera surgir para una raza dada de seres racionales extraterrestres, pero es razonable comenzar la búsqueda de radiación infrarroja de origen artificial observando los alrededores de las estrellas visibles y, sobre todo, en la dirección de las estrellas que se sabe son binarias con acompañante invisible.

La idea de Dyson es notable por el hecho de que presenta un ejemplo concreto de cómo la actividad de una sociedad inteligente podría cambiar un sistema planetario hasta el extremo de que tal transformación se podría de-

tectar a distancias interestelares. Pero una esfera de Dyson no es la única forma en que una civilización puede utilizar los recursos de energía disponibles de su sistema planetario. Hay otras fuentes que pueden ser aún más eficaces que la utilización completa de la radiación solar local.

Consideraremos primero el empleo de la masa de los planetas grandes como combustible para los reactores termonucleares. Los planetas joviales están compuestos principalmente de hidrógeno. La masa de Júpiter es de 2×10^{30} gramos y la abundancia de energía que se liberaría de la conversión de esta cantidad de hidrógeno en helio sería aproximadamente de 10^{49} erg, cantidad tremenda comparable a la desprendida de la explosión de una supernova. Si esta energía se liberara gradualmente a lo largo de un período de tiempo, por ejemplo a razón de 4×10^{33} erg s^{-1}, comparable a la luminosidad solar actual, duraría casi 300 millones de años, espacio de tiempo que lo más probable es que exceda al de supervivencia de la propia civilización técnica.

Quizá una civilización superdesarrollada pudiera también aprovechar una fracción de su propia estrella como fuente de energía. Por ejemplo, podría apropiarse de una pequeña parte de la masa solar sin que afectara significativamente a su luminosidad. Ciertamente que aún no sabemos los métodos para esa "expropiación" pero probablemente se conseguiría poco a poco. La conversión de, por ejemplo, 5×10^{31} gramos de hidrógeno solar — 25 veces más que la masa de Júpiter — proporcionaría unos 3×10^{50} erg, que es un suministro de energía adecuado para satisfacer las necesidades de una civilización técnica durante varios miles de millones de años.

También es concebible, aunque mucho menos probable, que ese aprovechamiento de la masa de una estrella ocurriera a mayor velocidad, regulada quizá de modo que la vida de la estrella correspondiera con la duración de la civilización. Las características espectrales de una estrella así variarían lentamente. En el momento en que la estrella se apagara, dejaría de existir la civilización. ≪ Pero aunque nos podemos imaginar tal "crepúsculo de los dioses", no es probable que entren en escena con frecuencia ≫.

Si se usa con inteligencia la enorme provisión de energía de que se dispone en el sistema solar, no será necesario construir una esfera de Dyson alrededor del Sol. Admitamos, por ejemplo, que la mitad de la masa de los planetas joviales se usara para construir satélites artificiales, las "ciudades del espacio" de Tsiolkovskii. Esas ciudades se establecerían en órbitas cercanas al Sol. Nos podemos imaginar reactores nucleares instalados en esos satélites y alimentados por el material restante de los planetas joviales. Este cuadro conserva el designio esencial del desarrollo de una civilización técnica imaginada en *Sueños de la Tierra y el Cielo*, pero añade como fuente de energía las reacciones termonucleares controladas.

Entonces, dadas estas enormes fuentes de energía controlada, las civilizaciones podrían expandir sus actividades en proporción mucho mayor. A continuación consideraremos algunas formas adicionales por las cuales una civilización podría anunciar su presencia a distancias interestelares. Estos mé-

pasado, llega a la conclusión de que es finita la duración de la vida racional en cualquier planeta y que esto es consecuencia inevitable del desarrollo del universo. Dice en su obra:

> Es un ciclo eterno en el cual se muda la materia, un ciclo que sin duda sólo completa su órbita en períodos de tiempo que para medirlos no resulta adecuado nuestro año terrestre, ciclo en el cual la duración de desarrollo máximo, la duración de la vida orgánica y aún más, la de la vida de los seres conscientes de la naturaleza y de sí mismos está tan limitada como el espacio en el cual la vida y autoconciencia entran en función; un ciclo en el que todo modo finito de existencia de materia, ya sea sólo vapor nebular, animal unidad o género de animales, combinación o disociación química,es igualmente transitorio y donde nada es eterno, sino que cambia eternamente, que muda eternamente la materia y las leyes según las cuales se muda y cambia. Y a pesar de todo y de ser inexorable, este ciclo se completa en el tiempo y en el espacio, aunque puedan aparecer y desaparecer muchos millones de soles y tierras, aunque transcurra mucho, antes de que se presenten las condiciones para la vida orgánica, aunque sean innumerables los seres orgánicos que tienen que surgir y extinguirse antes de que se desarrollen en su seno animales con cerebro capaz de discurrir y que sólo en un pequeño lapso de tiempo encuentren las condiciones adecuadas para la vida, tan sólo para ser exterminados más tarde sin misericordia, tenemos la seguridad de que la materia persiste eternamente la misma en todas sus transformaciones, que ninguno de sus atributos se puede perder nunca y que por tanto también con la misma necesidad férrea que exterminará en la Tierra su mayor creación, el ser pensador, tiene que producirlo de nuevo en alguna otra parte y en otra época.

Si la vida de una civilización técnica está limitada tan sólo por circunstancias astronómicas, podrían las civilizaciones perdurar miles de millones de años - período que podríamos pretender describir como "eterno" - y sería grande la probabilidad de que la vida racional fuera casi omnipresente. Pero como hemos visto en los capítulos precedentes pueden estar perfectamente limitadas las vidas de las civilizaciones. La mayoría de los investigadores opinan que esta escala de tiempo puede ser muy corta ≪ comparada con la edad de la Galaxia. ≫ No obstante, creemos que esta cuestión se tiene que volver a considerar a la luz de los recientes avances en cibernética y en biología molecular.

En la parte III de esta obra hemos empleado repetidamente las palabras "vida racional" por considerar que si significado era patente ¿Pero qué significa en realidad "vida racional"? Es racional o inteligente un ser si tiene capacidad para pensar? Y si es así . . . ¿qué entendemos por "pensar"?

≪ Hasta hace muy poco ≫ Se ha considerado el pensamiento humano como el único creativo conocido por el hombre. Así pues, cualquier definición de "pensamiento" y "raciocinio" lleva inevitablemente a la descripción de las actividades de los hombres o de las funciones concretas del cerebro humano.

Pero el físico soviético A. N. Kolmogorov ha puesto de relieve que tal

definición a la luz del saber actual no es satisfactoria por dos razones: Cuando progresen las investigaciones exploratorias del espacio y las astronómicas, se tiene la clara posibilidad de encontrar en otros planetas entes que tengan todos los atributos esenciales de la vida y del pensamiento pero que, sin embargo, sean fundamentalmente distintos de las formas de vida terrestre. Y la segunda, que existe ya la posibilidad de la duplicación de cualquier sistema material complejo ≪ y, en particular, la construcción artificial de una máquina de pensar. ≫ En consecuencia, se precisa con urgencia una definición funcional del nombre "pensamiento" que no esté confinada a las nociones preconcebidas respecto a la naturaleza física de este proceso.

El enfoque sistemático a ese punto de vista funcional de la vida y el pensamiento nos lleva a la sobrecogedora conclusión de que, según nuestra opinión, es de significado importante para el problema de la vida racional en el universo. Kolmogorov dice:

> . . . Un modelo de los procesos operativos y organización de un sistema material tiene que estar formado por otros elementos materiales en un sistema nuevo que posea las mismas características esenciales de organización que el sistema que se está modelando. Por lo tanto, un modelo lo suficientemente completo de ser biológico, en todo intachable, se tiene que llamar ser biológico y un modelo de ser que piensa tiene que llamarse ser pensador . . . Las siguientes cuestiones son de interés general:
>
> ¿Pueden las máquinas autorreproducirse? ¿Y pueden en el transcurso de tal reproducción ocurrir cambios evolutivos progresivos que lleven a la producción de máquinas nuevas que sean progresivamente más perfectas ≪ (es decir, que se adapten mejor a su medio ambiente) ≫ que sus predecesoras?
>
> ¿Pueden estas máquinas experimentar emociones? ¿Sentirían deseos, serían capaces de resolver los problemas originales que sus creadores no fundamentaron en ellas?
>
> Las respuestas negativas a estas cuestiones son con frecuencia el resultado de los conceptos erróneos siguientes: (a) una definición demasiado limitada del concepto de "máquina"; una interpretación idealista del concepto "pensamiento" por la cual es fácil demostrar que no sólo las máquinas, sino también los seres humanos no podrían pensar.
>
> . . . Sin embargo, es importante saber que dentro del marco de la ideología materialista no hay argumentos bien fundamentados contra una posible respuesta a nuestras cuestiones. La respuesta positiva estaría de acuerdo con los puntos de vista contemporáneos sobre el origen de la vida y sobre la base física del conocimiento. . .
>
> La posibilidad de construir seres biológicos completos a partir de unidades discretas capaces de procesar y controlar información, no contradice el principio del materialismo dialéctico.

Kolmogorov previene contra las especificaciones excesivamente sencillas de los requisitos básicos para la síntesis de seres racionales artificiales. En

la actualidad no comprendemos más que una pequeña parte de la actividad consciente del hombre. Sólo y hasta cierto punto el mecanismo del reflejo condicionado y de lógica formal. Queda mucho por hacer para una definición objetiva en función de la teoría de la información de lo intrincado de la actividad creativa del hombre y demás aspectos de ese sistema nervioso tan sumamente desarrollado.

Kolmogorov prosigue:

> . . . Un estudio objetivo serio de la actividad nerviosa superior del hombre es un eslabón necesario en el desarrollo de tal humanismo matemático. A medida que la ciencia progresa se erosionan progresivamente las ilusiones de la humanidad. En la fase de las verdades a medias y semiconocimientos, las llamadas "conclusiones destructivas" se convierten a menudo en argumentos contra la propia ciencia, en pro del idealismo y de lo irracional. Así pues, las ideas de Darwin sobre los orígenes de las especies y los estudios de Paulov del sistema nervioso superior se han descrito como degradantes de las capacidades superiores del hombre, rebajando su poder para crear ideales morales y estesía. Análogamente, en nuestro tiempo, el temor de que el hombre no es mejor que una máquina sin sentimientos, ha provocado un argumento lógico psicológico para el vitalismo y lo irracional.

Los seres mecánicos artificiales - los robots son el tema favorito de los escritores de temas de ciencia ficción. Se describen, por lo general, como un montaje de tuercas y tornillos con aspecto externo de hombre, pero activados por válvulas electrónicas. En su comedia R. U. R. (2) el notable dramaturgo checo Karel Čapek acuñó la palabra "robot" para describir un ser artificial semejante al hombre, formado por moléculas orgánicas. ≪ En la ciencia ficción de occidente la palabra "robot" ha evolucionado a seres artificiales, inorgánicos, por lo general metálicos, mientras que la palabra "androide" se emplea para el simulacro orgánico de ser humano. En realidad, la concepción original de Čapek del robot, y la idea contemporánea del androide son ambas posteriores al golem, un ser humano artificial que, según la leyenda popular judía, fue creado por el rabino de Praga para realizar los trabajos el Sabbath, día que estaba prohibido trabajar a los judíos por la ley bíblica. ≫ Es probable que una vez que la humanidad sepa y domine las sendas sintéticas para la producción de proteínas, bajo la guía de los ácidos nucleicos, los organismos biológicos artificiales tengan un aspecto externo natural. Pero es prematuro predecir exactamente como serán esos seres artificiales. Insistimos de nuevo en que la ciencia terrestre contemporánea y la tecnología no pueden todavía sintetizar ni siquiera el más simple de los seres vivos.

≪ En el capítulo 14 estimamos que el número de combinaciones posibles de los aproximadamente 4×10^9 pares de nucleótidos en los cromosomas humanos era $4^{4\times10^9}$ lo cual corresponde a unos 10^{10} bits de información contenidos en el código genético y necesarios para la construcción de un ser humano. No podemos comprobar que la información contenida en el cerebro humano sea probablemente todavía mayor que la del material genético. Hay del orden de 10^{10} neuronas en el cerebro, cada una de ellas probablemente con más de 100 conexiones (dendritas) con las otras neuronas. Se cree que el contenido de información del cerebro está al menos en parte almacenado por medio de dichas neuronas, aunque quizá sean más importantes los depósitos de información no eléctricos adicionales, como las proteinas o el RNA o inciuso la configuración de las membranas de las células del cerebro. El número de las posibles ordenaciones de 10^{10} neuronas, cada una con 100 dendritas, es de $10^{2\times10^{10}}$, que corresponde al contenido de información de unos 10^{13} bits. Aunque la gran mayoría de las neuronas del cerebro fueran superfluas o inactivas, la información contenida en el cerebro humano excede con creces a la del material genético. Esta es otra forma de decir que no nacemos con todo lo que sabemos y que el fuerte de nuestro saber lo adquirimos durante la vida.

2.- N. del T. R.U.R., *Rossum's Universal Robots*, escrita en 1920.

≪ La masa característica del cerebro humano es de unos 1300 gramos. Podemos considerar que una neurona típica tiene forma cilíndrica con radio de unos pocos micrómetros y longitud quizá de 1 mm; su volumen es pues $\pi\ (3 \times 10^{-4}\ \text{cm})^2\ (10^{-1}\ \text{cm})$, aproximadamente $3 \times 10^{-8}\ \text{cm}^3$. Como las neuronas, al igual que la demás materia biológica, tienen una densidad próxima a $1\ \text{g cm}^{-3}$ la masa de cada una es de 3×10^{-8} g. Por tanto, 10^{10} neuronas forman una masa de unos 300 gramos y vemos que la mayor parte de la masa total de nuestro cerebro está compuesta por neuronas.

≪ Los transistores, que en los modernos ordenadores son los análogos a las neuronas en el cerebro, tienen masas mucho mayores que los 3×10^{-8} g. Por tanto, un ordenador con el mismo número de unidades de conexión que hay en el cerebro humano, tendría que ser mucho más masivo. Por ejemplo, si cada transistor tuviera una masa de 1/100 g, la masa total del ordenador equivalente sería de 10^8 g, o sea 100 toneladas. Vemos que el cerebro humano está maravillosamente microminiaturizado.

≪ Muchos científicos opinan que las complejidades del pensamiento humano son simplemente la consecuencia de las existentes en las interacciones entre 10^{10} unidades. Entre los organismos terrestres, por lo general, aunque no rigurosamente, hay correspondencia entre la masa cerebral y la inteligencia, y aún es más sorprendente la que existe entre inteligencia y relación de masa del cerebro a masa total del cuerpo. Es en este contexto que resulta notable la gran masa del cerebro del delfín, comparable a la del cerebro humano. (Véase el capítulo 29.) Si la información contenida en los seres racionales de otros planetas está almacenada en unidades de masa comparable a la de nuestras neuronas, resulta claro que han de ser más o menos tan masivos como nosotros o aún más. No hay tendencia general para que las neuronas sean de menos masa en lo que quisiéramos ver como especie más avanzada en el planeta Tierra.

≪ Pero podemos imaginar otras posibilidades. Supongamos, por ejemplo, que la información no está contenida a nivel de las neuronas, sino a nivel molecular y que se toman las medidas para la estabilidad a largo plazo de esas moléculas portadoras de información. En el material genético, se emplean evidentemente esos depósitos de información molecular y ya hemos dicho que hay ciertas pruebas de que moléculas tales como las de RNA intervienen como base molecular de la memoria en los animales y quizá en las personas. Nos podemos imaginar una red cristalina en la que los átomos guardan la información según la posición que ocupan en la red. Si para cada posición son posibles 10 átomos, necesitamos unos 2×10^{10} átomos en total para reproducir el contenido de información del cerebro humano. Un cubo que contenga 2×10^{10} átomos tiene $(2 \times 10)^{1/3} = 5000$ átomos en una arista. Los átomos en un cristal están a distancias de unos pocos Ångströms; ese cristal cúbico tendría como unos 10^{-4} ó 1 micrómetro de arista. En las figuras 35-1 y 35-2 se muestran algunos ejemplos de codificación en miniatura de la tecnología moderna, pero que no llegan todavía a la eficacia de nuestro cubo.

≪ Este ejemplo del cubo, original de Philip M. Morrison, es probablemente el extremo en la compresión de información. Sería difícil extraer la información contenida dentro del cristal sin romper la contenida en los átomos exteriores. Pero otros ejemplos efectivamente ilustran que cabe concebir organismos mucho más pequeños que nosotros y que sin embargo tengan una cantidad de información muy superior. Si nuestra inteligencia se caracteriza por una capacidad de almacenamiento de información digamos de 10^{13} bits ¿qué tendríamos que explicar a un miembro de una civilización avanzada con capacidad de almacenamiento de 10^{20} bits?

≪ Estas consideraciones no sólo suponen que en alguna otra parte del universo puede haber seres con inteligencia superior a la nuestra, sino también, que podemos construir esos seres. ≫ Desde luego que tendrán que vencerse muchas dificultades antes de que se pueda construir un ser racional artificial. La mayor dificultad no está en el almacenamiento de la información, sino en el desarrollo del muy complicado programa que representa la operación real del cerebro y su sistema nervioso afín, que a su vez representa al pensamiento. En principio es posible construir una máquina compleja que resolviera los problemas por el uso de máquinas menores subordinadas en las cuales se pudieran introducir los problemas más sencillos. No obstante, tales máquinas en cascada parecen ser tediosas y lentas. Al presente, no está claro cómo se vencerán estas dificultades.

≪ Mucho se ha progresado ya en la construcción de máquinas lo suficientemente complejas como para aprender por la práctica y dar señales de imaginación creativa. Las máquinas calculadoras pueden realizar hoy en cuestión de segundos operaciones matemáticas que antes hubieran llevado años a todo un grupo de matemáticos. Existen todas las razones para creer que la inteligencia artificial será cada vez más aguda a medida que avance nuestra civilización. ≫ La cibernética, la biología molecular y la neurofisiología,

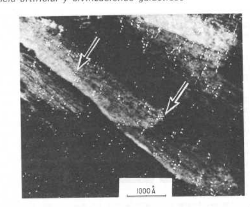


Figura 35-1. Fotografía de láminas especiales de mica, tomada con un microscopio electrónico; espesor de un solo cristal. El aumento es X 800000. Los agujeros hacia los que apuntan las flechas están producidos en la mica por desintegración radiactiva. El diámetro de cada agujero es de 50 - 100 Å. Para la codificación de información en microminiatura pueden ser muy útiles unos métodos parecidos. (Cortesía del Dr. H. Fernández Morán, Universidad de Chicago.)

actuando conjuntamente, quizá lleguen un día a crear seres racionales artificiales que apenas difieran de los hombres, excepto por estar más avanzados. Tales seres serían capaces de la autoperfección y probablemente de longevidad superior a la media humana.

Una causa supuesta de los procesos de envejecimiento de los organismos es la acumulación gradual de imperfecciones en el código genético a lo largo de la vida del individuo. ≪ Con el progresar del tiempo, cada vez se transmite al citoplasma más información sin sentido (véase el capítulo 14) y se perjudica al correcto funcionamiento celular. Pero los depósitos de información y los procedimientos de modificación de los organismos artificiales podrían ser más duraderos y más estables que los de los organismos contemporáneos. ≫

Con el tiempo podría llegar a no tener sentido la división de la vida racional en las dos categorías de natural y artificial. Podemos anticipar la síntesis de partes del cuerpo. Por ejemplo, todos sabemos que hoy se usan mucho algunas partes artificiales del cuerpo, tales como los dientes. ≪ La sustitución parcial de la función de nuestros ojos por lentes, es corriente desde hace siglos y hoy día estamos siendo testigos del rápido desarrollo de corazones, pulmones, riñones y otros órganos artificiales. ≫ Los seres racio-

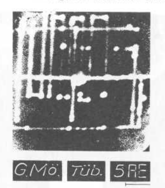


Figura 35-2. Arriba: Fotografía tomada con un microscopio electrónico de un circuito electrónico ultraminiatura preparado por fotograbación con un microrrayo electrónico sobre una película fotográfica especial ultrafina. Los anchos de las rayas son de 500 - 1000 Å y el aumento es X 10000. Abajo: Letras miniatura de menos de 1 micrómetro de altura grabadas sobre una película fina de colodión, usando como "punzón" un microrrayo electrónico. La escritura está hecha con un microscopio electrónico (según G. Möllenstdt y R. Speidel, Physik, Bl. 16, 192, 1960). (Cortesía del Dr. Fernández Morán, Universidad de Chicago.)

nales del futuro podrán ser en gran parte de órganos artificiales. ≪ ¿Queda pues fuera de duda que los cerebros de nuestros descendientes podrán ser también artificiales, de modo que dispongan de una vasta cantidad de información sin el tortuoso proceso de aprenderla?. Quizá en el futuro podamos conectarnos a unidades modulares que contengan el cuerpo completo de conocimiento de temas especializados, que podamos luego desconectarnos y volverlos a colocar en la "biblioteca" cuando no nos haga falta. ≫ En principio podemos anticipar la construcción de formas de vida altamente ooganizadas, inteligentes, de autoperfeccionamiento y no antropomorfos.

Hemos mencionado la posibilidad de que los seres racionales artificiales del futuro sean muy longevos. ≪ Sus civilizaciones podrían ser de mucha más duración que las de nuestro estilo. ≫ Esas vidas tan largas podrían ser una ventaja para el contacto interestelar entre comunidades avanzadas. La lentitud de la comunicación recíproca por radio a distancias interestelares tiende a que tal contacto no sea satisfactorio a los seres cuyas vidas se miden por décadas. Pero para seres de longevidad superior resultaría más interesante

tal comunicación. Además, esos seres podrían emprender vuelos interestelares a vastas distancias a velocidades subrelativistas ≪ sin necesidad de inhibidores metabólicos. ≫ Quizá se pudieran construir seres muy especializados para esos vuelos de tanta duración. Esos seres serían capaces de soportar las penalidades del vuelo y de cumplir las tareas que les esperaran al final del viaje. Sería imposible trazar una clara distinción entre tales máquinas automáticas especializadas - los seres biológicos racionales artificiales - ≪ y los organismos avanzados naturales de un tipo exótico. ≫

A la vida racional del universo le es posible hacer transformaciones cualitativas fundamentales de sí misma. ≪ Las mejoras principales en las longevidades de las civilizaciones técnicas avanzadas y de los organismos que las componen y distintos avances cualitativos de su inteligencia, hacen que sea mucho mayor la probabilidad de éxito del contacto interestelar.

≪ Consideremos ahora las posibilidades más en consonancia con lo expuesto al principio del capítulo. Quizá hoy no existe en ninguna parte una civilización técnica capaz de fabricar seres artificiales de larga vida y gran inteligencia o quizá, aun siendo capaces, las vidas de las civilizaciones técnicas iniciales son tan cortas que no resulta posible el desarrollo de una sociedad de seres racionales artificiales. ≫ ¿Podría bajo estas circunstancias una civilización avanzada crear un satélite artificial grande que contuviera el equipo electrónico capaz de despachar radiocomunicaciones interestelares durante millones de años o más? Ese satélite, puesto en órbita circular a altura suficiente sobre el planeta de origen, podría durar cientos de millones de años. Es posible que en nuestro sistema solar haya algún ejemplo de una luna así. (Véase el capítulo 26.) En realidad, cuando desarrollé por primera vez la hipótesis de que las lunas de Marte podrían ser de origen artificial, tenía tal función en la mente. La fuente de energía para el equipo a bordo del satélite podría ser el flujo de radiación del sol local o bien la fusión termonuclear controlada. Los emisores de radio a bordo del satélite transmitirían señales moduladas de acuerdo con un plan previamente programado; se podrían registrar las respuestas a las señales ≪ y estar ideadas, de acuerdo con el programa, las contestaciones automáticas a las mismas. ≫ De este modo se podría establecer el contacto recíproco por radio automático entre las civilizaciones galácticas.

Quedan, claro está, formidables problemas técnicos por resolver antes de que tal satélite sea factible. El equipo automático tiene que ser de funcionamiento estable y estar protegido durante un período de tiempo inmenso contra los meteoros.

Son tres las ventajas principales que tiene un satélite artificial para el contacto interestelar sobre la estación en la superficie planetaria. ≪ Primero, puede transmitir a frecuencias que absorbería la atmósfera planetaria o la ionosfera; ≫ segundo, la duración del satélite sería mucho mayor que la de la civilización que lo construyera; podría seguir en órbita millones de años después de haber desaparecido la civilización local. Y por último, en la época de desintegración y destrucción de la civilización que le dio el origen, el lugar

más seguro para tal período sería probablemente a bordo del mismo. En él, los instrumentos estarían protegidos no sólo contra las guerras, sino también contra la acción destructora del viento y del agua y contra los cambios geológicos de la superficie del planeta. Un satélite artificial muy instrumentado podría transmitir al cosmos durante millones de años los tesoros de la ciencia y la herencia de la cultura de una civilización muerta. Conocemos lo que sabían y pensaban los hombres de otras épocas por los libros que en su tiempo escribieron. ¿No es posible que las civilizaciones que haya por todo el universo adquieran también el saber y pensar de otras desvanecidas tiempo ha? Si algunas sociedades técnicas han ideado métodos para transmitir información al espacio durante largos períodos de tiempo, superiores al de su propia vida, resultará inmensurablemente aumentada la probabilidad de contacto entre las civilizaciones galácticas.

Bibliografía

Las siguientes referencias se dan en el orden aproximado en que se tratan sus temas en esta obra. Sólo unas pocas han sido escritas principalmente para los profesionales y de éstas, las más teóricas van marcadas con asterisco.

1. *Knowledge and Wonder*, de Victor Weisskopf (Anchor Books, 1962). Exposición magistral de muchas cuestiones elementales de química, física, biología y astronomía. Se recomienda sobre todo al lector sin base científica.

2.* *The Scientific Endeavor* (Rockefeller Institute Press, 1965). Describe la gran mayoría de los interesantes logros de la investigación científica contemporánea en una colección de artículos presentados en una conferencia de conmemoración del centésimo aniversario de la fundación de la Academia Nacional de Ciencias de los Estado Unidos.

3. *Fads and Fallacies in the Name of Science*, de Martin Gardner (Dover Publications, New York, 1957). Ensayo intrigante de pseudociencia, con una pequeña descripción del culto a los platillos volantes.

4. *The World of Flying Saucers: A Scientific Examination of a Major Myth of the Space Age*, de Donald H. Menzel y Lyle B. Boyd (Doubleday, 1963). Extensa exposición sobre los platillos volantes y conclusión de que no son más que objetos naturales mal interpretados.

5. *Encyclopedia Americana*. Parte del capítulo 2 de este libro se basa en el artículo sobre "objetos voladores no identificados" de Carl Sagan, escrito para la edición de 1967 de esa enciclopedia.

6. *Anatomy of a Phenomenon: Unidentified Objects in Space — A Scientific Appraisal*, de Jacques Vallee (Henry Regnery Co., Chicago, 1965). Quizá el libro más moderado, a pesar de algunos errores de hecho y de interpretación, que concluye que algunos platillos volantes pueden ser vehículos espaciales de extraterrestres.

Parte I — El Universo

7. *Exploration of the Universe*, de George Abell (Holt, Rinehart y Winston, 1964). Excelente introducción a la astronomía, en particular a los estudios estelares y galácticos. Obra de texto universitaria.

8. *The Universe*, de Isaac Asimov (Walker and Company, New York, 1966). Exposición introductoria muy clara del mismo tema, destinada al público en general, en la que se explican también las quasars.

9. *The Universe*, de Otto Struve (M. I. T. Press, Cambridge, Massachusetts, 1962). Algo más detallada y semicuantitativa.

10. *Elementary Astronomy*, de Otto Struve, Beverly Lynds y Helan Pillans (Oxford University Press, 1959). Otro excelente libro de texto de introducción a la astronomía.

11. *Frontiers of Astronomy*, de Fred Hoyle (Harper, 1955). Exposición clara de variedad de asuntos astronómicos, aunque ligeramente no al día.

12. *The History of Astronomy*, de A. Pannekoek (John Wiley & Sons, 1961). Trata los aspectos históricos de la astronomía.

13. *Physics of Interstellar Space*, de S. B. Pikelner (Foreign Languages Publishing House, Moscow, 1961). Tratado extenso del medio interestelar, expuesto en forma sencilla.

14. Artículo de W. H. Fowler, con exposición puesta al día del origen de los elementos, que aparece en la referencia 2.

15. *Cosmic Radio Waves*, de I. S. Shklovskii (Harvard University Press, 1960). En esta obra se resumen muchas de las contribuciones de Shklovskii a la radioastronomía.

16* *Structure and Evolution of Stars*, de Martin Schwarzschild (Princeton University Press, 1958). El mejor libro contemporáneo sobre la evolución de las estrellas.

17* *Introduction to Astrophysics: The Stars*, de Jean Dufay, traducido por Owen Gingerich (Dover, 1964). Buen texto introductorio sobre las atmósferas estelares.

18. *The Hubble Atlas of Galaxies*, de Alan Sandage, publicación 618 del Carnegie Institution de Washington, D. C., 1961. Soberbia colección de láminas de galaxias fotografiadas en los Observatorios de Monte Wilson y Monte Palomar, acompañada de la explicación de sus evoluciones.

19* *Galaxies, Nucley and Quasars*, de Fred Hoyle (Harper, 1965). Discurso interesante sobre muchos de los asuntos que se tratan en la parte I.

20. *The Mystery of the Expanding Universe*, de William Bonner (Macmillan, 1964). Quizá la mejor exposición popular de cosmogonía que explica con resultado positivo para el profano los conceptos más sofisticados.

21. *The Einstein Theory of Relativity: A Trip to the Fourth Dimension*, de Lillian R. Lieber y Hugh Gray Lieber (Holt, Rinehart y Winston, New York, 1945). Exposición novelada de la teoría de la relatividad especial y de la general que empieza con álgebra elemental y avanza hasta temas cuantitativos de la curvatura del espacio, etc.

22. *Mr. Tompkins in Paperback*, de George Gamow (Cambridge University Press, 1965). Excursión popular fascinante a la cosmología, relatividad y teoría cuántica.

23. *Mathematics and the Imagination*, de Edward Kasner y James R. Newman (Simon and Schuster, 1953). Googoles, googolplejos y otras delicias matemáticas.

24* *Origin of the Solar System*, de Robert Jastrow y A. G. W. Cameron (Academic Press, New York, 1963). Fuente conveniente de los aspectos históricos y modernos del origen del sistema solar expuestos como conferencias.

25. *Origin of the Earth and Planets*, de B. J. Levin (Foreign Languages Publishing House, Moscow, 1956). Versión soviética traducida al inglés del origen del sistema solar.

26. *Cosmic View: The Universe in Forty Jumps*, de Kees Boeke (John Day, 1957). Descripción pictórica fascinante de la escala del universo.

Parte II — Vida en el Universo

27. *Biology and the Exploration of Mars* (U. S. National Academy of Sciences, Washington, D. C., 1966). Comentarios sobre la vida extraterrestre, escritos durante dos años por 66 científicos de varias disciplinas. Abarca temas sobre el origen y naturaleza de la vida, los entornos del sistema solar, pruebas de vida en Marte y estrategia de la exploración marciana.

28. *Extraterrestrial Life: An Anthology and Bibliography* (U. S. National Academy of Sciences, Washington D. C., 1966). Colección de muchos artículos importantes sobre el origen de la vida y asuntos afines. Incluye un artículo clásico de J. B. S. Haldane y la más completa bibliografía publicada sobre los temas de las partes II y III de esta obra.

29. *A Direct Entry to Organic Chemistry*, de John Read (Harper Torchbooks, 1960). Una buena introducción a las cuestiones de química orgánica que intervienen en la biología molecular contemporánea.

30* *Molecular Biology of the Gene*, de James D. Watson (W. A. Benjamin, Inc., 1965). Clásico moderno de biología molecular escrito por uno de los principales de ese campo.

31. *The Genetic Code*, de Isaac Asimov (Signet Science Library, 1962). Tratado más elemental del mismo tema.

32. *Cell Structure and Function*, de A. G. Loewy y Philip Siekevitz (Holt, Rinehart, and Winston, 1963). Una de las mejores introducciones a la biología celular.

33. *The Molecular Basis of Evolution*, de C. R. Anfinsen (John Wiley, 1963). Obra muy recomendable.

34. *Time's Arrow and Evolution*, de Harold Blum (Princeton University Press, 2ª edición, 1961). Aspectos físicos y biológicos de los seres vivos, incluyendo la cuestión de la adaptación al medio ambiente.

35. *Life: Its Nature, Origin and Development*, de A. I. Oparin, (Oliver and Boyd, London, 1961). Exposición introductoria por un pionero de la materia.

36. *The Dawn of Life*, de J. H. Rush (New American Library, 1962). Otra exposición popular del origen de la vida.

37* *The Origins of Prebiological Systems*, de A. I. Oparin y J. B. S. Haldane, editado por S. W. Fox (Academic Press, 1965). Actas de un simposio sobre el origen de la vida en el que participaron estos dos pioneros.

38. *The Meaning of Evolution*, de George Gaylord Simpson (Yale University Press, 1949). Exposición popular básica de la evolución que proporciona un acompañante moderno excelente del "Origen de las especies", de Darwin.

39. *The inmense Journey*, de Loren Eiseley (Random House, 1957), y

40. *Nature and Man's Fate*, de Garrett Hardin (Mentor, 1959), son dos excursiones excitantes a la biología y la evolución.

41. *Earth, Moon and Planets*, edición revisada de Fred L. Whipple (Harvard University Press, 1963). Texto introductorio popular clásico sobre los planetas.

42* *The Atmospheres of Mars and Venus*, editado por W. W. Kellogg y Carl Sagan (National Academy of Sciences, National Research Council, Publicación 994, Washington, D. C., 1961). Exposición interdisciplinaria más teórica, pero ya algo atrasada.

43* *Proceedings of the Caltech — J. P. L. Lunar and Planetary Conference*, editada por Harrison Brown (obtenible en el Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, California, 1966). Simposio con los resultados de la misión del Mariner IV. En esta conferencia se cubren también los estudios de la Luna.

44. *The Earth and Its Atmosphere*, editado por D. R. Bates (Basic Books, 1957). Introducción a la Tierra como planeta.

45* *Study of the Earth: Readings in Geological Science*, editado por J. F. White (Prentice Hall, 1962). A nivel más teórico.

46* *The Origin and Evolution of Atmospheres and Oceans*, editado por P. J. Brancazio y A. G. W. Cameron (John Wiley, 1964). El origen de algunas características de nuesto ambiente, referido a otros planetas del sistema solar.

47* *Measure of the Moon*, de Ralph Baldwin (University of Chicago Press, 1963). Tratado completo de problemas lunares, incluyendo las cuestiones de su origen.

48* *The Planets*, de Harold C. Urey (Yale University Press, 1952). Una de las primeras exposiciones de la Luna y los planetas, con dedicación especial a sus orígenes.

49. *Planets*, de Carl Sagan y Jonathan Leonard (Life Science Library, 1966). Introducción a la astronomía planetaria maravillosamente ilustrada, al alcance de todo el mundo.

50. *Pictorial Guide to the Planets*, de Joseph H. Jackson (Thomas Y. Crowell, 1965). Del mismo estilo que la anterior.

51* *Planets and Satellites*, editada por G. P. Kuiper y B. M. Middlehurst (University of Chicago Press, 1961). Antología técnica excelente sobre el sistema solar.

52. *A Photographic History of Mars*, de Earl C. Slipher (Lowell Observatory Publications, Flagstaff, Arizona, 1962). Colección soberbia de fotografías de Marte con algunos de los supuestos canales.

53. *Meteors, Comets and Meteorites*, de Gerald S. Hawkins (McGraw-Hill, 1964). Exposición introductoria a los fragmentos del sistema solar.

54. *Between the Planets*, edición revisada, de Fletcher G. Watson (Doubleday, 1962). Del mismo estilo que la anterior.

55. *Life in the Universe*, de A. I. Oparin y V. G. Fessenkov (Foreign Languages Publishing House, Moscow; también se puede adquirir en Twayne and Company, 1961). Obra soviética que combina temas de biología con astronomía y que trata de la vida extraterrestre.

56. *Concepts for Detection of Extraterrestrial Life*, editado por Freeman H. Quimby (NASA Document SP56, U. S. Government Printing Office, 1964). Exposición de métodos para la detección de vida extraterrestre.

Parte III — Vida racional en el Universo

57* *Interstellar Communication*, editado por A. G. W. Cameron (W. A. Benjamin, Inc., 1963). Colección útil de artículos a los que se hace referencia en esta obra. Contiene artículos de Shklovskii, Huang, Dyson, Von Hoerner, Cocconi y Morrison, Bracewell, Schwartz y Townes, y un pequeño resumen de J. P. T. Pearman, de la conferencia de la Comisión de Ciencia del Espacio sobre vida racional extraterrestre.

58. *We Are Not Alone*, de Walter Sullivan (McGraw-Hill, 1964). Exposición popular estimulante sobre mundos habitados.

59* *Planetary and Space Science*, vol. II, pág. 485 (1963), revista. Parte de lo expuesto en los capítulos 29, 32 y 33 está sacado del artículo de Carl Sagan titulado "Direct Contact Among Galactic Civilizations by Relativistic Interstellar Space Flight".

60* *Soviet Astronomy* — A. J., vol. 8 pág. 217 (1964). (Traducción inglesa de la revista soviética *Astronomicheskhi Yournal*.) Opiniones de N. S. Kardashev sobre las civilizaciones de los tipos I, II y III, en el artículo "Transmisión de información por civilizaciones extraterrestres".

61* *Astrophysical Journal* (junio, 1966), "The Infrared detectability o of Dyson civilizations", de Carl Sagan y Russell G. Walker. Exposición más completa de las civilizaciones de Dyson.

62. *Of Stars and Men*, de Harlow Shapley (Beacon Press, Boston, 1958). Trata de la vida racional extraterrestre y de amplia variedad de temas.

63. *Of Men and Galaxies*, de Fred Hoyle (University of Washington Press, 1964). Obra sobre los mismos temas que la anterior y con iguales principios filosóficos.

T

U

V

W